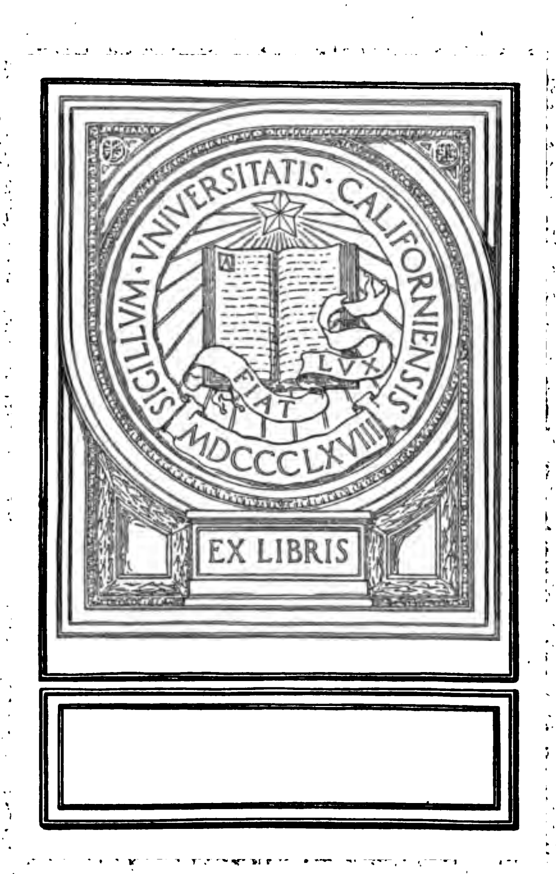
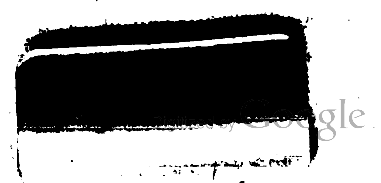

SIGILLVM · VNIVERSITATIS · CALIFORNIENSIS
FIAT LVX
MDCCCLXVIII
EX LIBRIS



МНОГОФАЗНЫЕ ТОКИ.

Alternating Current Electricity

СОСТАВИЛИ

Роде и Бюске

Инженеры искусствъ и мануфактуръ.

Перевелъ съ французскаго

И. Денисевичъ.

Съ 71 рисункомъ.



Изданіе Ф. В. Щепанскаго.
С.-ПЕТЕРБУРГЪ
Невскій проспектъ № 34.
1895.

Дозволено цензурою.
С.-Петербургъ, 6 Февраля 1895 года.

Тип. Н. Финдейзена, М. Морская 9.

Замѣтка отъ издателей французскаго оригинала.

До сихъ поръ не было еще издано ни одного труда, который разсматривалъ бы во всемъ его цѣломъ этотъ совершенно новый вопросъ многофазныхъ токовъ. Ихъ значенiе, ихъ будущее въ примѣненiи къ передачѣ электрической энергiи на разстоянiе, вотъ мотивы, которые вызвали вполнѣ законченное сочиненiе Гг. Роде и Бюске.

Послѣ краткаго историческаго очерка авторы разсматриваютъ послѣдовательно генераторы, двигатели съ вращающимся полемъ, трансформаторы и канализацiю. Описанiе установокъ во Франкфуртѣ на Майнѣ, въ Гейльбронѣ на Некарѣ и въ Будапештѣ удачно заканчиваетъ этотъ трудъ, необходимый для каждаго электротехника.

ЗАМѢЧЕННЫЯ ОПЕЧАТКИ.

Страница.	Строка.	Напечатано.	Слѣдуетъ.
19	послѣдняя	$S' = \frac{V}{\ } - 2S$	$S' = \frac{V}{l} - 2S$
38	16	относительной потери v' въ вольтахъ	относительной потери v въ вольтахъ
45	15	Пусть V	Пусть V'
75	10	съ токами cc', dd'	съ точками cc', dd'
94	формула (17)	$b = q + \frac{C'_2}{2} e\sqrt{m\alpha} + \frac{q^2 - C_1}{C'_2} e - \sqrt{m\alpha}$	$b = q + \frac{C'_2}{2} e^{\sqrt{m\alpha}} + \frac{q^2 - C_1}{C'_2} e^{-\sqrt{m\alpha}}$
107	формула (31)	$\pi l\beta_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + \pi nt\right)$	$\rho l\beta_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + 2\pi nt\right)$
146	1	трансформаторы	изоляторы
173	формула (6)	$j_2 - j_1 = i_3$	$j_2 - j_1 = i_2$

СОДЕРЖАНІЕ.

ПЕРВАЯ ЧАСТЬ.

Вычисленіе линіи передачи энергіи посредствомъ многофазныхъ токовъ.

ВТОРАЯ ЧАСТЬ.

Генераторы многофазныхъ токовъ.

ТРЕТЬЯ ЧАСТЬ.

Теорія и вычисленіе двигателей съ вращающимся полемъ.

ЧЕТВЕРТАЯ ЧАСТЬ.

Трансформаторы многофазныхъ токовъ.

ПЯТАЯ ЧАСТЬ.

Устройство канализацій и описаніе нѣкоторыхъ установокъ.



ПЕРВАЯ ЧАСТЬ.

Вычисленіе линіи передачи энергіи посредствомъ многофазныхъ токовъ.

ГЛАВА I.

Историческій очеркъ.

Въ электродвигателяхъ постояннаго тока, точно также какъ и въ двигателяхъ перемѣннаго тока, механическая пара, производящая вращеніе оси двигателя, образуется отъ взаимодѣйствія неподвижнаго магнитнаго поля и подвижныхъ обмотокъ, по которымъ пробѣгаетъ внѣшній токъ, непосредственно доставляемый машинѣ.

Въ послѣднее время изысканія электротехниковъ направлены къ изслѣдованію третьяго рода электродвигателей не съ неподвижнымъ, а съ вращающимся магнитнымъ полемъ, которое въ своемъ круговращательномъ движеніи увлекаетъ за собою подвижной органъ машины.

Вращающееся магнитное поле можетъ сообщать движеніе электрической цѣпи точно также, какъ и металлической пластинкѣ. Это происходитъ вслѣдствіе явленій электромагнитной индукціи, которыя имѣютъ мѣсто въ этихъ различныхъ проводникахъ, находящихся въ присутствіи вращающагося магнитнаго поля.

Уже въ 1824 году Гамбей наблюдалъ, что колебанія магнитной полосы быстро прекращаются, если подъ нею укрѣплена неподвижная металлическая пластинка. Если эта пластинка подвижна, какъ въ опытѣ съ дискомъ Араго, и если магнитную стрѣлку замѣнить сильнымъ вращающимся магнитомъ, то этотъ послѣдній сообщитъ вращательное движеніе и диску, какъ будто-бы между этими двумя предметами происходило нѣчто въ родѣ электромагнитнаго тренія.

Замѣтимъ, однако, что такого рода двигатели не могутъ имѣть никакого практическаго примѣненія, такъ какъ магниту, который въ данномъ случаѣ увлекаетъ за собою дискъ, должно быть сообщено механическимъ путемъ движеніе на мѣстѣ самаго опыта. Слѣдовательно, такіе двигатели нисколько не разрѣшаютъ задачи передачи силы на разстояніе.

Эта задача состоитъ въ томъ, чтобы произвести вращающееся магнитное поле на разстояніи; она была разрѣшена впервые Феррарисомъ въ 1888 году.

Этотъ ученый электротехникъ показалъ возможность полученія вращающагося магнитнаго поля безъ помощи магнита, а исключительно взаимодѣйствіемъ двухъ катушекъ, расположенныхъ подъ прямымъ угломъ, по которымъ пропускаются перемѣнные токи, представляющіе между собою нѣкоторую разницу въ фазахъ. Для осуществленія этого, двѣ катушки были введены, одна въ первичную цѣпь трансформатора, другая же во вторичную цѣпь, включенную послѣдовательно съ большимъ сопротивленіемъ безъ самоиндукціи.

Такое расположеніе даетъ возможность увеличивать разность фазъ первичныхъ и вторичныхъ токовъ до тѣхъ поръ, пока получится два тока съ разностью фазъ въ одну четверть періода. Магнитныя поля этихъ двухъ токовъ образуютъ одно равнодѣйствующее магнитное поле, вращающееся равномѣрнымъ движеніемъ и имѣющее довольно постоянное напряженіе.

Мѣдный цилиндръ, помѣщенный внутри такого поля, увлекается имъ, какъ дискъ Араго, въ ту же сторону, въ которую происходитъ вращеніе магнитнаго поля.

Употребленіе двухъ отодвинутыхъ токовъ требуетъ двухъ проводниковъ на каждую катушку, т. е. всего четырехъ проволокъ или же минимумъ трехъ, если взять одну проволоку за общій обратный проводникъ токовъ.

Около того же времени, какъ и Феррарисъ, Тесла работалъ надъ системой передачи силы на разстояніе, основанной на аналогичномъ принципѣ, а именно: токи, отодвинутые на 90 градусовъ, производились въ двухъ катушкахъ подъ прямымъ угломъ динамо перемѣннаго тока и собранные отдѣльно эти токи передавались посредствомъ четырехъ проволокъ такому же числу обмотокъ на кольцеобразномъ индукторѣ двигателя. Индукціонная подвижная часть послѣдняго состояла изъ простой желѣзной арматуры безъ обмотокъ или же съ большимъ или меньшимъ числомъ этихъ послѣднихъ, замкнутыхъ на себя.

Первый изъ этихъ двухъ типовъ представляетъ собою наиболѣе простой двигатель, который можно только придумать. Въ такомъ синхроничномъ двигателѣ арматура вращается согласно съ магнитнымъ полемъ, т. е. съ тою же скоростью, какъ это послѣднее, на подобіе арматуры, увлекаемой магнитомъ. Электродвигатели же втораго типа дѣйствуютъ въ силу индукціонныхъ токовъ, возбуждаемыхъ вращающимся магнитнымъ полемъ въ обмоткахъ арматуры.

Впослѣдствіи Тесла искалъ возможности довести число проволокъ до двухъ, какъ это дѣлается въ обыкновенныхъ передачахъ. Въ такомъ случаѣ генераторъ производитъ только одинъ токъ, который, при приближеніи къ двигателю, развѣтвляется на двѣ цѣпи, имѣющія различныя самоиндукцію и сопротивленіе, что и вызываетъ искомую разницу въ фазахъ токовъ. Въ такихъ двигателяхъ обмотки арматуры замыкаются на себя въ моментъ пусканія двигателя въ ходъ. Затѣмъ, когда двигатель пріобрѣлъ уже надлежащую скорость, эти обмотки могутъ

быть введены въ главную цѣпь, чѣмъ усиливается и поддерживается первоначальное дѣйствіе этой послѣдней, какъ это дѣлается также въ обыкновенныхъ двигателяхъ, работающихъ перемѣннымъ токомъ.

Примѣненіемъ совершенно различнаго принципа удалось тому же Тесла получить, пользуясь однимъ только токомъ, тѣ же результаты, которые даютъ многофазные токи. Въ этомъ случаѣ арматура двигателя помѣщается между двумя системами электромагнитовъ, расположенныхъ такимъ образомъ, чтобы намагничиваніе одной группы запаздывало по отношенію къ намагничиванію другой группы, результатомъ чего является нѣчто подобное вращающемуся намагничиванію, которое въ концѣ концовъ дѣйствуетъ также, какъ и токи, отодвинутые на одну четверть фазы, и побуждаетъ арматуру двигателя къ перемѣщенію.

Работы Гутена и Леблана надъ примѣненіемъ конденсаторовъ къ перемѣннымъ токамъ привели этихъ электротехниковъ къ устройству машины, основанной на совершенно особомъ принципѣ. Катушки, по которымъ пропускаются токи, отодвинутые на одну четверть фазы, расположены такимъ образомъ, что каждая группа изъ четырехъ катушекъ составляетъ полный магнитный циклъ. Каждая изъ этихъ группъ производитъ вращающееся магнитное поле, которое перемѣщается на уголъ, обхватываемый четырьмя катушками, въ теченіи одной фазы токовъ возбудителей.

Эти катушки соотвѣтственно распредѣлены между двумя цѣпями, составляющими отвѣтвленія кабелей передачи, питаемыхъ обыкновенной динамо перемѣннаго тока; разность фазъ между токами двухъ отвѣтвленій получается посредствомъ конденсаторовъ, введенныхъ въ одно изъ отвѣтвленій.

Въ 1889 году Брадлей устроилъ динамо, могущую служить безразлично для производства постоянныхъ токовъ или перемѣнныхъ, отодвинутыхъ на одну четверть періода. Этотъ результатъ достигнутъ раздѣленіемъ обмотки

кольца Грамма на четыре секціи, которыя упираются въ четыре угольника обыкновеннаго коллектора, расположенные на двухъ взаимно-перпендикулярныхъ діаметрахъ. На двухъ парахъ металлическихъ колецъ, соединенныхъ соотвѣтственно съ каждымъ изъ этихъ угольниковъ, можно собрать два перемѣнные тока, подобные тѣмъ, которые производятъ двѣ группы противоположныхъ катушекъ, т. е. съ разностью фазъ въ одну четверть періода. Наоборотъ, можно получить постоянный токъ, если его собрать на коллекторѣ динамо.

Двигатель Брадлея основанъ на томъ же принципѣ, какъ и его динамо. Кольцо, заключенное въ бронзовый барабанъ, покрытый обмоткой проволоки изъ мягкаго желѣза, получаетъ при посредствѣ четырехъ колецъ два отодвинутые тока и, вслѣдствіе дѣйствія токовъ Фуко и намагничиванія, происходящихъ въ барабанѣ служащемъ индукторомъ, приходитъ въ движеніе обратное движенію полюсовъ вращающагося поля.

Двигатель Шукерта снабженъ также индукціонной частью раздѣленной на секціи и соединенной, какъ было указано выше, четырьмя изолированными кольцами, прикрѣпленными къ оси. Этотъ якорь представляетъ собою простое сплюснутое кольцо, которое вращается между двумя парами электромагнитовъ, соединенныхъ одноименными полюсами. Въ началѣ движенія вращающійся магнитный потокъ развиваетъ въ электромагнитахъ сильную индукцію, которая облегчаетъ пусканіе въ ходъ двигателя. Сила этой индукціи уменьшается, когда скорость якоря, движущагося въ направленіи обратномъ движенію вращающагося поля, достигаетъ синхронизма и такимъ образомъ вмѣстѣ съ этимъ абсолютная скорость поля приближается къ нулю. Тогда возбуждаютъ электромагниты индуктора, чтобы увеличить вращающую пару, сохранивъ въ то же время синхронизмъ движенія кольца и вращающагося поля.

Динамо Элигю Томсона производитъ двухфазные токи въ двухъ прямоугольныхъ обмоткахъ своей арматуры, вра-

щающейся между двумя полюсами; эти токи собираются, какъ и въ машинѣ Брадлея, посредствомъ четырехъ щетокъ, соприкасающихся съ двумя парами колецъ, соединенныхъ съ концами обмотокъ индукціонной части динамо.

Всѣ способы, придуманные для уменьшенія числа проводниковъ передачи, какъ напримѣръ употребленіе конденсаторовъ, представляютъ лишь одни затрудненія при практическомъ ихъ примѣненіи. Вслѣдствіе этого электротехники были принуждены искать разрѣшенія задачи передачи силы на разстояніе въ новой комбинаціи токовъ, а именно въ примѣненіи такъ называемыхъ трехфазныхъ токовъ. Первые опыты въ этомъ направленіи относятся къ 1888 году и принадлежатъ Брадлею. Около того же времени Газельвандеръ взялъ привилегію на этотъ предметъ точно также, какъ и Всеобщая Компанія Электричества въ Берлинѣ, а въ слѣдъ затѣмъ Венстромъ въ Англіи и въ 1890 году Доброволькій въ Берлинѣ.

Типомъ трехфазныхъ электродвигателей можетъ служить двигатель Добровольскаго. Этотъ двигатель имѣетъ индукторомъ кольцо Грамма, снабженное зубцами, между которыми сдѣланы обмотки, порождающія вращающееся поле; арматуру составляетъ цилиндръ изъ массивнаго желѣза, по перефиріи котораго вправлены мѣдныя проволоки. Динамо, точно также какъ и двигатели, снабжены тремя парами катушекъ, по обмоткамъ которыхъ проходятъ токи съ разностью фазъ въ 120 градусовъ. Такая система токовъ обладаетъ замѣчательнымъ свойствомъ, а именно: каждый изъ токовъ въ каждый моментъ равенъ суммѣ двухъ другихъ и имѣетъ противоположный этой суммѣ знакъ. Вслѣдствіе этого, представляется возможнымъ совершенно уничтожить обратный проводъ для каждаго изъ токовъ и такимъ образомъ довести число кабелей передачи до трехъ.

Изъ этого проистекаетъ также и то, что различныя обмотки въ машинахъ пріемникахъ и производителяхъ тока

могутъ быть соединены въ одну общую точку своими концами, ненаходящимися въ связи съ проводниками передачи.

Добровольскій придумалъ еще другую систему, позволяющую увеличить число токовъ возбудителей съ цѣлью полученія болѣе постояннаго поля, не увеличивая въ тоже время числа проводовъ. Для этого онъ вводитъ между катушками, принадлежащими къ двумъ цѣпямъ, отодвинутымъ на извѣстный уголъ, третью систему катушекъ, питаемыхъ токомъ, происходящимъ отъ соединенія двухъ первыхъ токовъ. Отодвинутіе между послѣдовательными катушками, такимъ образомъ расположенными, уменьшается на половину, тогда какъ число катушекъ производителей вращающагося поля увеличивается вдвое.

Можно примѣнить этотъ же принципъ раздвоенія фазъ также и къ трансформаторамъ и получить, напримѣръ съ помощью трехъ первичныхъ токовъ, шесть токовъ, отодвинутыхъ на 30 градусовъ.

Когда требуется передача силы для приведенія въ дѣйствіе двигателей, то система трехъ проволокъ вполнѣ отвѣчаетъ всѣмъ требованіямъ эксплоатаціи; но когда требуется распредѣлять токъ для освѣщенія, то необходимо употребить еще и четвертую проволоку для возстановленія равновѣсія между тремя цѣпями, неодинаково нагруженными.

Броунъ примѣнилъ первый систему передачи силы посредствомъ трехфазныхъ токовъ, установивъ такую передачу въ 500 лошадиныхъ силъ между Бюлахомъ и Эрликономъ на разстояніи 24 километровъ.

Эта система получила новое подтвержденіе своей практичности при опытахъ надъ передачей силы отъ Лауфена до мѣста выставки во Франкфуртѣ на Майнѣ, гдѣ была установлена передача 190 лошадиныхъ силъ на разстояніе 175 километровъ съ промышленнымъ полезнымъ дѣйствіемъ на мѣстѣ потребленія въ 73%.

Напряженіе тока передачи было опредѣлено въ 15.000 вольтовъ. Употреблявшіеся при этихъ опытахъ двигатели работали при слабомъ напряженіи, которое увеличивалось по выходѣ изъ станціи отправленія посредствомъ первичнаго трансформатора до напряженія необходимаго, чтобы пройти большое разстояніе. На конечной станціи это напряженіе уменьшалось посредствомъ вторичнаго трансформатора до предѣла, потребнаго для пользованія имъ.

Если прибавить, что машины трехфазнаго тока отличаются весьма простою конструкціей, не имѣютъ коллектора и часто даже щетокъ, напряженіе ихъ слабо, что онѣ совершенно безопасны и легко изолируются, а также, что трехфазные двигатели могутъ быть пущены въ ходъ безъ всякаго затрудненія и способны безъ остановокъ переносить большую разницу въ нагрузкѣ, то станетъ понятнымъ, что такая система одновременно соединяетъ въ себѣ преимущества передачи силы посредствомъ перемѣнныхъ токовъ и преимущества пользованія двигателями, работающими постояннымъ токомъ.

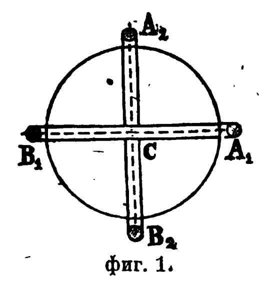
Мы поставили себѣ цѣлью спеціально изслѣдовать въ этомъ трудѣ условія передачи электрической энергіи посредствомъ многофазныхъ токовъ, краткій историческій очеркъ которыхъ мы только что представили.

ГЛАВА II.

Общія основанія.

Двухфазные токи.—Разсмотримъ двѣ обмотки $A_1\ B_1$, $A_2\ B_2$ на цилиндрѣ C, расположенныя по направленію двухъ взаимно-перпендикулярныхъ діаметровъ; пропустимъ чрезъ $A_1\ B_1$ перемѣненный токъ вида:

$$(1) \qquad i_1 = I \sin 2\pi \frac{t}{T} = I \sin mt.$$

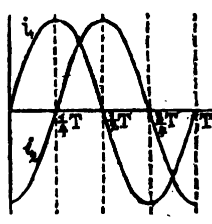


фиг. 1.

и чрезъ A_2 B_2 токъ такой-же средней силы какъ и первый, но съ запозданіемъ на одну четверть фазы или что то же, отодвинутый на одну четверть фазы относительно перваго; этотъ второй токъ будетъ имѣть выраженіемъ:

$$(2) \qquad i_2 = \mathrm{I} \sin\left(2\pi\frac{t}{T} - \frac{\pi}{2}\right) = -\mathrm{I} \cos mt.$$

Каждая изъ обмотокъ дастъ магнитное поле перпендикулярное къ своей плоскости, напряженіе и направленіе котораго будутъ измѣняться пропорціонально силѣ и сообразно направленію тока.

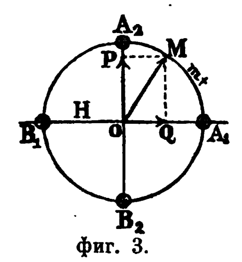


фиг. 2.

Назовемъ чрезъ H наибольшую величину поля одной изъ обмотокъ; величины h_1 и h_2 полей въ какой нибудь моментъ времени t будутъ, предполагая постояннымъ сопротивленіе магнитной цѣпи:

$$(3) \qquad h_1 = \mathrm{H} \sin mt.$$

$$(4) \qquad h_2 = -\mathrm{H} \cos mt = \mathrm{H} \sin\left(2\pi\frac{t}{T} - \frac{\pi}{2}\right)$$



фиг. 3.

Нанесемъ углы на кругѣ A_1 A_2 B_1 B_2, радіусъ котораго равенъ H.

Два магнитныя поля будутъ для A_1B_1 : OP, для A_2B_2 : OQ.

Эти два поля имѣютъ равнодѣйствующую:

$$(5) \qquad \mathrm{OM} = \sqrt{\mathrm{H}^2 \sin^2 mt + \mathrm{H}^2 \cos^2 mt} = \mathrm{H}.$$

Равнодѣйствующее магнитное поле имѣетъ, слѣдовательно, величину постоянную и равную наибольшей величинѣ одного изъ составляющихъ полей. Оно вращается вокругъ точки O по направленію A_1A_2 съ постоянною скоростью, такъ какъ равнодѣйствующая проходитъ чрезъ точку M, и дѣлаетъ полный оборотъ въ теченіи одного періода.

Трехфазные токи. Разсмотримъ теперь три обмотки A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3 на цилиндрѣ, расположенныя по тремъ меридіональнымъ плоскостямъ, образующимъ между собою углы въ 120 градусовъ или $\frac{2\pi}{3}$.

Пропустимъ чрезъ эти обмотки три тока i_1, i_2, i_3, отодвинутые на $\frac{2\pi}{3}$ одинъ относительно другого.

$$(6)\qquad A_1B_1 \quad i_1 = I \sin mt.$$

$$(7)\qquad A_2B_2 \quad i_2 = I \sin\left(mt - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$(8)\qquad A_3B_3 \quad i_3 = I \sin\left(mt - \frac{4\pi}{3}\right)$$

фиг. 4.

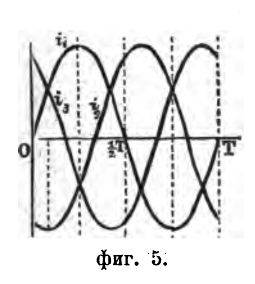
Отсюда:

$$i_1 + i_2 + i_3 = I\left[\sin mt + \sin\left(mt - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(mt - \frac{4\pi}{3}\right)\right] = 0.$$

Алгебраическая сумма синусовъ трехъ угловъ неизмѣнно равна нулю.

Магнитныя поля трехъ обмотокъ перпендикулярны соотвѣтствующимъ плоскостямъ обмотокъ и если предполо-

жить сопротивленіе магнитной цѣпи постояннымъ, то три составляющія поля будутъ имѣть выраженіемъ:



фиг. 5.

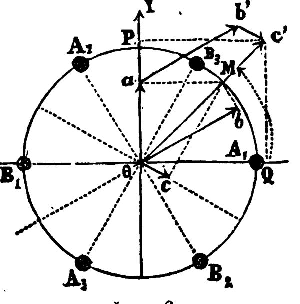
$$(9) \qquad h_1 = \text{H} \sin mt$$

$$(10) \qquad h_2 = \text{H} \sin \left(mt - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$(11) \qquad h_3 = \text{H} \sin \left(mt - \frac{4\pi}{3} \right)$$

H наибольшая величина поля, произведеннаго одной изъ обмотокъ.

Будемъ считать, какъ и раньше, время t по окружности $A_1 B_3 B_2$ и пусть будетъ M точка, соотвѣтствующая времени t.



фиг. 6.

Три составляющія суть: Oa, Ob, Oc; ихъ равнодѣйствующая есть прямая Oc', которая дополняетъ многоугольникъ векторовъ $Oab'c'$ этихъ трехъ составляющихъ.

Чтобы вычислить Oc', проектируемъ многоугольникъ $Oab'c'$ на двѣ взаимноперпендикулярныя оси OA_1 и OY. Имѣемъ:

$$(12) \qquad Oc' = \sqrt{\overline{\text{OP}}^2 + \overline{\text{OQ}}^2}.$$

Такъ какъ алгебраическая сумма трехъ составляющихъ постоянно равна нулю, то одна изъ нихъ, напримѣръ Ob, имѣетъ противоположный знакъ двумъ другимъ и равна абсолютной своею величиною ихъ суммѣ. Слѣдовательно, имѣемъ, Oa, Ob, Oc абсолютныя величины:

$$(13) \qquad Oa - Ob + Oc = o$$

или

$$Oa - ab' + b'c' = o$$



$$(14) \qquad OP = Oa + (ab' - b'c') \sin \frac{\pi}{6}$$

$$= H \sin mt \, (1 + 1/2)$$

$$OQ = (ab' + b'c') \cos \frac{\pi}{6}$$

$$(15) \qquad = (2\, ab' - Oa) \cos \frac{\pi}{6}$$

$$= \left(2\, H \cos\left(mt - \frac{\pi}{6}\right) - H \sin mt\right) \cos \frac{\pi}{6} =$$

$$= \left(1 + \frac{1}{2}\right) H \cos mt.$$

Откуда:

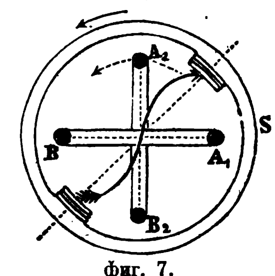
$$(16) \qquad oc' = \left(1 + \frac{1}{2}\right) H \sqrt{\sin^2 mt + \cos^2 mt} = \left(1 + \frac{1}{2}\right) H.$$

Равнодѣйствующее магнитное поле имѣетъ, слѣдовательно, величину постоянную и равную наибольшей величинѣ каждаго изъ составляющихъ полей, повторенной полтора раза. Кромѣ того, такъ какъ двѣ дополнительныя составляющія OP и OQ находятся въ отношеніи sin mt къ cos mt, то равнодѣйствующая Oc' проходитъ чрезъ точку M; слѣдовательно, поле вращается вокругъ точки O отъ A_1 къ A_2 съ постоянною скоростью и дѣлаетъ полный оборотъ въ теченіи періода.

Двигатели многофазные или съ вращающимся полемъ.

Если вокругъ системы катушекъ, подобной уже описаннымъ нами и питаемой двумя или тремя отдвину-

тыми токами, мы расположимъ кольцо S изъ мягкаго желѣза, съ двумя выступами и съ замкнутой обмоткой,

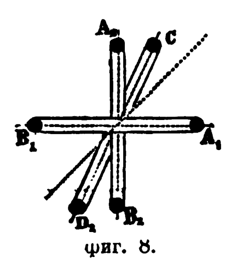


фиг. 7.

укрѣпленное на двухъ стержняхъ помѣщенныхъ въ пересѣченіи плоскостей обмотокъ, то вращающееся магнитное поле увлечетъ за собою эту желѣзную арматуру по направленію, указанному на рис. 7.

Если сопротивленіе не слишкомъ велико, то кольцо въ своемъ движеніи будетъ слѣдовать за полемъ съ тою же скоростью, какъ и это послѣднее. Въ этомъ случаѣ будемъ имѣть синхроничный двигатель, приходящій въ дѣйствіе автоматически. Указанный принципъ былъ примѣненъ послѣдовательно въ двигателяхъ Брадлея, Шукерта и др.

Если же вмѣсто кольца S изъ мягкаго желѣза расположимъ вокругъ системы катушекъ металлическое кольцо или обмотку CD, замкнутую на себя и снабженную стержнями, оси которыхъ совпадаютъ съ пересѣченіемъ двухъ индуктирующихъ катушекъ A_1B_1, A_2B_2, то линіи силъ вращающагося поля, пересѣкая обмотку CD, возбудятъ въ ней индукціонный токъ, воздѣйствіе котораго на поле заставитъ подвижную катушку или арматуру придти въ движеніе.



фиг. 8.

Напряженіе, а слѣдовательно и токъ, возбужденный въ арматурѣ, будутъ пропорціональны числу пересѣченныхъ линій силъ, а также, вслѣдствіе этого, и *относительной скорости* вращающагося поля и арматуры; та же пропорціональность будетъ и относительно механической пары двигателя, если не принимать во вниманіе воздѣйствія индукціоннаго органа двигателя на поле.

Пара эта будетъ имѣть свой максимумъ, когда арматура двигателя будетъ находиться въ покоѣ. Если внѣшнее механическое сопротивленіе, которое долженъ преодо-

лѣть двигатель, не слишкомъ велико, то онъ приходитъ въ дѣйствіе самъ и его скорость будетъ увеличиваться до тѣхъ поръ, пока средняя двигающая пара не будетъ равна парѣ сопротивленія.

Въ силу этого, очевидно, арматура должна вращаться медленнѣе поля, такъ какъ, для того чтобы въ индукціонномъ органѣ двигателя существовалъ токъ, необходимо пересѣченіе имъ линій силъ, т. е., чтобы было *возростающее запозданіе* арматуры относительно движенія поля. Такого рода двигатель имѣетъ большое сходство съ двигателемъ, работающимъ постояннымъ токомъ, такъ какъ первый подобно послѣднему самъ приходитъ въ дѣйствіе, будучи уже нагруженнымъ, и его скорость измѣняется вмѣстѣ съ количествомъ работы, которую онъ долженъ произвести. Это измѣненіе скорости можетъ быть, однако, сдѣлано очень незначительнымъ, какъ и для двигателя, работающаго постояннымъ токомъ. Таковъ основной принципъ двигателей Доливо-Добровольскаго.

ГЛАВА III.

Канализація.

1. Линія двухфазнаго тока. Двухфазный токъ есть ничто иное, какъ два перемѣнные тока съ разностью фазъ въ $^1/_4$ періода; онъ можетъ быть произведенъ двумя динамо перемѣннаго однофазнаго тока, оси которыхъ соединены муфтой подъ угломъ, соотвѣтствующимъ $^1/_4$ періода. Эти два тока могутъ быть проведены по двумъ отдѣльнымъ линіямъ 1—3, 2—4.

A 1
C 3
D 4
B 2

фиг. 9.

Въ нашихъ вычисленіяхъ мы предположимъ, что линія не имѣетъ ни самоиндукціи, ни электроемкости. Въ

разсматриваемомъ случаѣ вычисленіе то же, что и для двухъ обыкновенныхъ линій съ однофазнымъ токомъ.

Пусть будетъ R общее сопротивленіе четырехъ проволокъ; потенціалы A и B разнятся на одну четверть фазы, также какъ и потенціалы C и D.

Пусть будетъ E и I эффективныя напряженіе и сила каждаго изъ токовъ, которые мы предположимъ пока равными.

Если мы назовемъ чрезъ $\frac{K}{100}$ потерю въ проводникахъ, то будемъ имѣть для каждой линіи:

$$(17) \qquad 2\,R\,I^2 = \frac{K}{100}\,E\,I$$

$$(18) \qquad R = \frac{K}{100}\,\frac{E\,I}{2\,I^2} = \frac{K}{100}\,\frac{E}{2\,I}$$

S, l и ρ поперечное сѣченіе, длина и удѣльное сопротивленіе одного изъ проводниковъ, слѣдовательно:

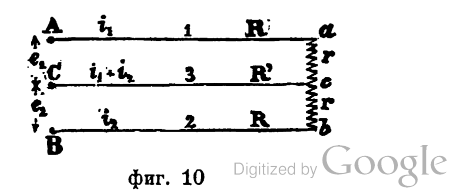
$$R = \frac{\rho\,l}{S} = \frac{K}{100}\,\frac{E\,I}{2I^2}$$

$$S = \frac{2\,\rho\,l\,I^2}{\frac{K}{100}E\,I}$$

Общій объемъ металла:

$$V = 4\,S\,l = \frac{8\,\rho\,l^2\,I^2}{\frac{K}{100}E\,I}$$

Для того чтобы упростить линію и сократить число изоляторовъ, двѣ обратныя проволоки 3 и 4 замѣняютъ одной общей для 1 и 2. Предположимъ двѣ линіи Aa, Cc,



фиг. 10

Bb, Cc, замкнутыя равными сопротивленіями r безъ самоиндукціи.

Имѣемъ, согласно опредѣленію двухфазныхъ токовъ:

$$(19)\begin{cases} e_1 = E\sqrt{2}\sin mt \\ e_2 = E\sqrt{2}\sin\left(mt - \frac{\pi}{2}\right) = -E\sqrt{2}\cos mt \end{cases}$$

E эффективное напряженіе каждаго тока. Такимъ образомъ:

$$(20)\begin{cases} e_1 = (R + r)\, i_1 + R'(i_1 + i_2) \\ e_2 = (R + r)\, i_2 + R'(i_1 + i_2) \end{cases}$$

$$(21)\begin{cases} E\sqrt{2}\sin mt = (R + r)\, i_1 + R'(i_1 + i_2) \\ -E\sqrt{2}\cos mt = (R + r)\, i_2 + R'(i_1 + i_2) \end{cases}$$

Откуда:

$$(22)\quad i_1 - i_2 = \frac{E\sqrt{2}(\sin mt + \cos mt)}{R + r} = \frac{2\ E \sin\left(mt + \frac{\pi}{4}\right)}{R + r}$$

$$(23)\quad i_1 + i_2 = \frac{E\sqrt{2}(\sin mt - \cos mt)}{R + r + 2R'} = \frac{2\ E \sin\left(mt - \frac{\pi}{4}\right)}{R + r + 2R'}$$

Получаемъ изъ 22 и 23:

$$(24)\qquad i_1 = E\left(\frac{\sin\left(mt + \frac{\pi}{4}\right)}{R + r} + \frac{\sin\left(mt - \frac{\pi}{4}\right)}{R + r + 2R'}\right)$$

$$= E\left(\frac{\cos\left(mt - \frac{\pi}{4}\right)}{R + r} + \frac{\sin\left(mt - \frac{\pi}{4}\right)}{R + r + 2R'}\right)$$

(25) $$i_2 = E\left(\frac{\sin\left(mt - \frac{\pi}{4}\right)}{R + r + 2R'} - \frac{\sin\left(mt + \frac{\pi}{4}\right)}{R + r}\right)$$

$$= E\left(\frac{\sin\left(mt - \frac{\pi}{4}\right)}{R + r + 2R'} - \frac{\cos\left(mt - \frac{\pi}{4}\right)}{R + r}\right)$$

Допустимъ, что:

(26) $$\frac{R + r + 2R'}{R + r} = 1 + \frac{2R'}{R + r} = tg\, 2\pi\varphi$$

Получаемъ посредствомъ извѣстнаго преобразованія:

(27) $$i_1 = E\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{R + r + 2R'}{R + r}\right)^2}}{R + r + 2R'} \sin\left(mt - \frac{\pi}{4} + 2\pi\varphi\right)$$

(28) $$i_2 = E\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{R + r + 2R'}{R + r}\right)^2}}{R + r + 2R'} \sin\left(mt - \frac{\pi}{4} - 2\pi\varphi\right)$$

Эти два послѣднія равенства показываютъ, что фазы токовъ i_1, i_2 и напряженій e_1, e_2 не одинаковы; i_1 находится впереди e_1 на $\left(2\pi\varphi - \frac{\pi}{4}\right)$ фазы, а i_2 запаздываетъ относительно e_2 на $\left(2\pi\varphi + \frac{\pi}{4}\right)$ фазы.

Разность фазъ i_1 и i_2 равна:

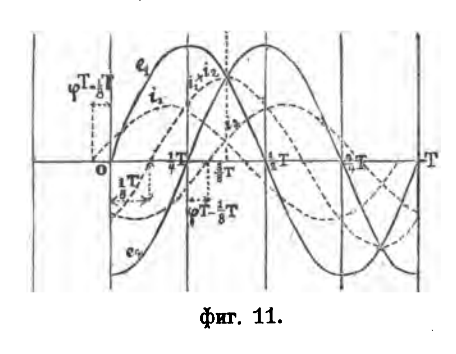
$$2 \times 2\pi\varphi$$

Слѣдовательно, напряженія e_1, e_2 разнятся на $^1/_4$ періода, токи же i_1, i_2 разнятся болѣе чѣмъ на $^1/_4$ періода, такъ какъ:

$$tg\, 2\pi\varphi = \frac{R + r + 2R'}{R + r} = 1 + \frac{2R'}{R + r} > 1$$

$$2\,\pi\,\varphi > \frac{\pi}{4} \qquad 2 \times 2\,\pi\,\varphi > \frac{\pi}{2}$$

На фиг. 11 изображены напряженія и токи въ соотвѣтствующихъ имъ фазахъ.



фиг. 11.

Уравненіе (23) показываетъ, что токъ, который проходитъ по промежуточной проволокѣ (3) запаздываетъ относительно e_1 на $^1/_8$ періода и находится впереди e_2 на $^1/_8$ періода; онъ запаздываетъ относительно i_1 на φ T и находится впереди i_2 также на φ T.

Средняя эффективная тока есть:

$$(29) \qquad \frac{E\sqrt{2}}{R + r + 2\,R'}$$

Это токъ, который произведетъ въ цѣпи съ сопротивленіемъ $R + r + 2\,R'$ электровозбудительная сила, равная эффективному напряженію между A и C, умноженному на $\sqrt{2}$.

Мы увидимъ дальше, что на практикѣ отодвинутіе токовъ i_1 и i_2 относительно напряженій e_1, e_2 можетъ быть не принято во вниманіе; такъ въ примѣрѣ, приводимомъ нами ниже, относительно линіи съ потерей въ 15 %, абсолютная величина этого отодвинутія равна $3^0{,}5$. Мы пренебрежемъ этимъ отодвинутіемъ и допустимъ въ нашихъ вычисленіяхъ, что фазы токовъ i_1, i_2 совпадаютъ съ фазами e_1, e_2.

Мы допустимъ безъ замѣтной ошибки, что:

$$\sqrt{1 + \left(\frac{R + r + 2\,R'}{R + r}\right)^2} = \sqrt{2}$$

Средняя эффективная i_1 и i_2 будетъ слѣдовательно:

$$I = \frac{E}{R + r + 2R'}$$

Распредѣленіе металла, дающее минимальную потерю мощности въ проводникахъ даннаго вѣса:

Потеря мощности, относящаяся къ одному изъ токовъ линіи, напримѣръ i_1, есть:

(30) $$W = \frac{1}{T}\int_0^T \left(R\, i_1^2\, dt + R'\,(i_1 + i_2)\; i_1\, dt\right)$$

$$= R\,I^2 + R'\,I\sqrt{2}\;I \cos\left[(i_1 + i_2)\, i_1\right]$$

$$= R\,I^2 + R'\,I^2\sqrt{2}\cos\frac{\pi}{4}$$

$$= (R + R')\,I^2$$

Общая потеря мощности на линіи будетъ:

$$W = 2\,(R + R')\,I^2$$

Или

$$W = 2\,R\,I^2 + 2\,R'\,I^2$$

Пусть будетъ:
ρ удѣльное сопротивленіе металла;
l длина каждой проволоки;
S поперечное сѣченіе проволокъ 1 и 2;
S′ сѣченіе проволоки 3;
V общій объемъ металла.

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

$$R' = \frac{\rho l}{S'}$$

$$V = 2\,S\,l + S'\,l$$

$$S' = \frac{V}{l} - 2\,S$$

Слѣдовательно:

$$(31)\qquad W = 2\,I^2 \rho l \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{\frac{V}{l} - 2S} \right)$$

Условіе минимума W есть:

$$\text{или}\qquad -\frac{1}{S^2} + \frac{2}{\left(\frac{V}{l} - 2\,S\right)^2} = 0$$

$$(32)\qquad 2\,S^2 - \frac{4\,V\,S}{l} + \left(\frac{V}{l}\right)^2 = 0$$

Корень, который, очевидно, можно допустить:

$$(33)\qquad S = \frac{V}{l}\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) = 0{,}295\,\frac{V}{l}$$

Слѣдовательно:

$$(34)\qquad S' = \frac{V}{l} - 2\,S = \frac{V}{l}(\sqrt{2} - 1) = 0{,}41\,\frac{V}{l}$$

Поперечныя сѣченія проволокъ 1, 2, 3 находятся приблизительно въ отношеніи:

1 : 1 : 1,4

$$(35)\qquad \frac{S'}{S} = \frac{4}{3}$$

$$(36)\qquad \frac{R'}{R} = \frac{3}{4}$$

Отсюда выводится потеря въ уаттахъ:

$$(37)\quad W = 2\,I^2 \rho l \left(\frac{1}{0{,}295\,\frac{V}{l}} + \frac{1}{0{,}41\,\frac{V}{l}} \right) = 11{,}66\,\rho\,\frac{l^2}{V}\,I^2$$

Въ случаѣ однофазнаго тока такой же мощности потеря при одинаковомъ объемѣ металла была бы:

$$(38) \qquad W' = 16 \frac{\rho l^2}{V} I^2.$$

Если же допустить равную потерю, то объемъ V' металла опредѣлится изъ уравненія:

$$16 \rho \frac{l^2}{V'} I^2 = 11{,}66 \rho \frac{l^2}{V} I^2$$

$$(39) \qquad \frac{V'}{V} = \frac{16}{11{,}66} = 1{,}37$$

$$\frac{V}{V'} = \frac{11{.}66}{16} = 0{,}73.$$

Канализація при двухфазныхъ токахъ тремя проводами при равной потерѣ и одинаковомъ напряженіи даетъ, слѣдовательно, экономію въ 27% сравнительно съ линіей однофазной.

Съ другой стороны, если въ двухфазной системѣ имѣемъ между двумя крайними проволоками то же напряженіе, какъ и въ однофазной системѣ, то напряженіе между крайней проволокой и средней должно быть:

$$\frac{E}{\sqrt{2}}$$

и тогда объемъ V'' опредѣлится изъ уравненія:

$$\frac{V''}{V'} = \frac{V \times (\sqrt{2})^2}{V'}$$

$$V'' = V' \times 0{,}73 \times 2 = V' \times 1{,}46.$$

Слѣдовательно, двухфазные токи мало годны для передачъ на большое разстояніе.

Уравненія (33), (34) и (37) даютъ непосредственно поперечныя сѣченія проволокъ и общій объемъ металла для

извѣстной потери W въ уаттахъ. Напримѣръ: пусть требуется передать мощность въ 100.000 уаттовъ при 2000 вольтахъ на разстояніе 5 километровъ; согласны на потерю 15°/о.

$$2\,EI = 2 \times 25^{a} \times 2000^{v} = 100.000 \text{ уаттовъ}$$

$$I\sqrt{2} = 35^{a},25$$

$$W = 0,15 \times 100.000^{w} = 15.000^{w}.$$

Изъ уравненія (37) при $\rho = 18^{\omega}$ имѣемъ:

$$V = \frac{11,66 \times 18^{\omega} \times 5^2 \times 25^2}{15.000^{w}} = 218 \text{ куб. дециметр.}$$

Такъ какъ за соотвѣтствующія единицы взяты километръ и квадратный миллиметръ, то объемъ V выразится въ кубическихъ дециметрахъ.

Вѣсъ мѣди равенъ $9^{kgs} \times 218 = 1962^{kgs}$.

Изъ уравненій (33) и (34) получаемъ:

$$S = 0,3\,\frac{V}{l} = 0,3 \times \frac{218}{5}\;13^{mm^2},08$$

$$S' = 0,4\,\frac{V}{l} = 0,4 \times \frac{218}{5}\;17^{mm^2},44$$

Линія будетъ состоять, слѣдовательно, изъ двухъ проволокъ въ 4,1 миллиметра каждая и одной проволоки въ 4,7 миллиметра въ діаметрѣ.

Въ данномъ случаѣ будемъ имѣть, слѣдовательно:

$$R = 6^{\omega},88$$

$$R' = 4^{\omega},84$$

Кромѣ того:

$$2\,r\,I^2 = 100.000^{w} - 15.000^{w} = 85.000^{w}$$

Слѣдовательно:

$$r = \frac{85.000^w}{2I^2} = 68 \text{ омамъ.}$$

Итакъ:

$$tg\, 2\,\pi\varphi = I + \frac{2\,R'}{R + r} = 1{,}129$$

$$2\,\pi\varphi = 48^0 30'$$

$$2\,\pi\varphi - \frac{\pi}{4} = 3^0 30'$$

$$\cos 3^0 30' = 0{,}998$$

Въ приведенномъ примѣрѣ токи i_1, i_2 отодвинуты, слѣдовательно, относительно e_1, e_2 на $3^0{,}5$, уголъ, которымъ на практикѣ можно пренебречь. Болѣе:

$$\sqrt{1 + \left(\frac{R + r + 2\,R'}{R + r}\right)^2} = 1{,}50$$

Допущенное нами предположеніе, что средніе эффективные токи $(i_1 + i_2)$ и i_1 или i_2 находятся въ отношеніи $\sqrt{2} : 1$, выражаетъ, такимъ образомъ, дѣйствительное отношеніе только приблизительно. Это отношеніе въ данномъ примѣрѣ есть:

$$\sqrt{2} : \frac{1.5}{\sqrt{2}} = 1{,}33$$

То есть, что токъ въ проволокѣ 3 слабѣе, чѣмъ мы это допустили и равенъ: $I' = I \times 1{,}33$, вмѣсто: $I \times 1{,}41$.

Такъ какъ:

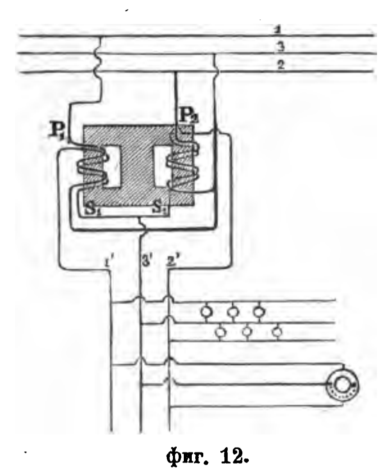
$$\frac{I'^2}{2\,I^2} = 0{,}88$$

то потеря въ уаттахъ въ проволокѣ 3 будетъ, слѣдовательно, въ дѣйствительности на $12^0/_0$ меньше вычислен-

ной и общая потеря будетъ на 6% меньше, чѣмъ мы это допустили, вслѣдствіе чего мы можемъ уменьшить еще на 12% поперечное сѣченіе проволоки 3.

Напомнимъ, что по отношенію къ изолированію наибольшее значеніе имѣетъ напряженіе въ крайнихъ проволокахъ, въ нашемъ примѣрѣ это напряженіе достигаетъ $2000 \times \sqrt{2} = 2800$ вольтовъ.

Вторичная канализація. Въ два ряда первичныхъ катушекъ P_1P_2 трансформатора пропускается токъ по отвѣтвленіямъ изъ трехъ проволокъ. Два тока низкаго напряженія, производимые вторичными катушками S_1S_2, распредѣляются посредствомъ вторичной канализаціи между тремя проволоками 1′, 2′, 3′ или четырьмя проволоками. Двигатели питаются посредствомъ отвѣтвленій изъ трехъ проволокъ.



фиг. 12.

Лампочки должны быть помѣщены между 1′3′ и 2′3 такимъ образомъ, чтобы на каждой изъ двухъ линій 1′3′. и 2′3′ было приблизительно одинаковое число дѣйствующихъ лампочекъ.

Вторичная канализація въ три проволоки 1′, 2′, 3′ можетъ быть вычислена подобно тому, какъ это было указано выше.

Когда двухфазные токи питаютъ двигатели съ непрерывною обмоткою, получающею токъ, какъ напримѣръ, кольцо или барабанъ, примѣненный въ двигателѣ Шукерта, въ такихъ случаяхъ два вторичные тока трансформатора должны быть произведены двумя отдѣльными катушками и должны быть проведены отъ трансформатора къ

двигателю съ помощью двухъ отдѣльныхъ линій, т. е. посредствомъ четырехъ проволокъ. Въ этомъ случаѣ вторичная канализація можетъ быть вычислена, какъ двойная вторичная канализація съ однофазнымъ токомъ.

Линія трехфазнаго тока.

Въ системѣ трехфазныхъ токовъ цѣпи, производящія токъ, также какъ и цѣпи пріемники, могутъ имѣть два различныя соединенія.

На фиг. 13 изображено *соединеніе треугольникомъ*. Три проводника цѣпи производящей G, также какъ и цѣпи пріемника R, составляютъ одну замкнутую цѣпь; каждая вершина треугольника соединена съ проволокой линіи.

фиг. 13.

Фиг. 14 изображаетъ схему *соединенія звѣздочкой*. Три проводника цѣпи производящей, также какъ и цѣпи пріемника, имѣютъ общіе концы O, O′, какъ въ индукціонной части динамо Томсона Хустона, другой же конецъ каждаго проводника соединенъ съ проволокой линіи.

фиг. 14.

Наконецъ, можно различно комбинировать между собою эти системы: такъ генераторъ можетъ имѣть соединеніе звѣздочкой, а пріемникъ соединеніе треугольникомъ или одновременно и треугольникомъ и звѣздочкой.

Мы разсмотримъ послѣдовательно эти различные случаи.

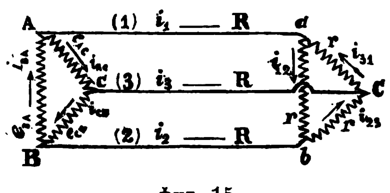
1. Соединеніе треугольникомъ.

Пусть будетъ ABC цѣпь генератора, индукціонная часть динамо или вторичная обмотка трансформатора и *abc* цѣпь пріемника.

R общее сопротивленіе проволокъ линіи.

r общее сопротивленіе проводниковъ цѣпи пріемника.

Эти сопротивленія предполагаются безъ самоиндукціи.



фиг 15.

e_{BA}, e_{CB}, e_{AC} разности потенціаловъ между точками В и А, С и В, А и С въ моментъ времени t.

Токи въ данный моментъ въ различныхъ цѣпяхъ изображены на фиг. 15; стрѣлки указываютъ ихъ положительное направленіе.

Мы предположимъ, что у зажимовъ трехъ проводниковъ AB, BC, CA произведено три разности синусоидальныхъ потенціаловъ, отодвинутыхъ попарно на ¹/₃ періода, такъ что:

$$(1)\left\{\begin{aligned} e_{BA} &= E\sqrt{2}\sin mt \\ e_{CB} &= E\sqrt{2}\sin\left(mt - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_{AC} &= E\sqrt{2}\sin\left(mt - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned}\right.$$

E эффективное напряженіе между концами каждаго элемента генератора.

Имѣемъ также:

$$(2) \qquad e_{BA} + e_{CB} + e_{AC} = o$$

Очевидно:

$$(3)\left\{\begin{aligned} i_1 &= -i_{AC} + i_{BA} = i_{1,2} - i_{3,1} \\ i_2 &= -i_{BA} + i_{CB} = i_{2,3} - i_{1,2} \\ i_3 &= -i_{CB} + i_{AC} = i_{3,1} - i_{2,3} \\ & i_1 + i_2 + i_3 = o \end{aligned}\right.$$

Если мы допустимъ, что токи i_{BA}, i_{CB}, i_{AC} синусоидальны и отодвинуты попарно на ¹/₃ періода, то будемъ имѣть:

$$(4) \qquad i_{BA} + i_{CB} + i_{AC} = o$$

Кромѣ того:

$$(5) \begin{cases} e_{BA} = R(i_1 - i_2) + ri_{1,2} \\ e_{CB} = R(i_2 - i_3) + ri_{2,3} \\ e_{AC} = R(i_3 - i_1) + ri_{3,1} \end{cases}$$

Сложимъ эти три уравненія; въ силу (2) получимъ:

$$(6) \qquad O = r(i_{1,2} + i_{2,3} + i_{3,1}) \quad i_{1,2} + i_{2,3} + i_{3,1} = o$$

Изъ уравненій (3) и (4)

$$(7) \begin{cases} i_1 + i_2 = i_{2,3} - i_{3,1} = i_{1,2} + 2\, i_{2,3} \\ i_2 + i_3 = i_{3,1} - i_{1,2} = i_{2,3} + 2\, i_{3,1} \\ i_3 + i_1 = i_{1,2} - i_{2,3} = i_{3,1} + 2\, i_{1,2} \\ i_1 - i_2 = 3\, i_{1,2} = 3\, i_{BA} \\ i_2 - i_3 = 3\, i_{2,3} = 3\, i_{CB} \\ i_3 - i_1 = 3\, i_{3,1} = 3\, i_{AC} \end{cases}$$

Слѣдовательно:

$$(8) \begin{cases} i_{1,2} = i_{BA} \\ i_{2,3} = i_{CB} \\ i_{3,1} = i_{AC} \end{cases}$$

$$(9) \begin{cases} i_1 = 2\, i_{1,2} + i_{2,3} \\ i_2 = 2\, i_{2,3} + i_{3,1} \\ i_3 = 2\, i_{3,1} + i_{1,2} \end{cases}$$

Изъ уровненій (1), (3), (5), (7) и (8) выводимъ:

$$(10) \begin{cases} i_{1,2} = i_{BA} = \dfrac{E\sqrt{2}\sin mt}{3R + r} \\ i_{2,3} = i_{CB} = \dfrac{E\sqrt{2}\sin\left(mt - \frac{2\pi}{3}\right)}{3R + r} \\ i_{3,1} = i_{AC} = \dfrac{E\sqrt{2}\sin\left(mt - \frac{4\pi}{3}\right)}{3R + r} \end{cases}$$

$$(11)\quad \begin{cases} i_1 = \dfrac{E\sqrt{2}}{3R+r}\left[\sin mt - \sin\left(mt - \dfrac{4\pi}{3}\right)\right] \\ \quad = \dfrac{E\sqrt{3}\sqrt{2}}{3R+r}\sin\left(mt - \dfrac{\pi}{6}\right) \\ i_2 = \dfrac{E\sqrt{2}}{3R+r}\left[\sin\left(mt - \dfrac{2\pi}{3}\right) - \sin mt\right] \\ \quad = \dfrac{E\sqrt{3}\sqrt{2}}{3R+r}\sin\left(mt - \dfrac{2\pi}{3} - \dfrac{\pi}{6}\right) \\ i_3 = \dfrac{E\sqrt{2}}{3R+r}\left[\sin\left(mt - \dfrac{4\pi}{3}\right) - \sin\left(mt - \dfrac{4\pi}{3}\right)\right] \\ \quad = \dfrac{E\sqrt{3}\sqrt{2}}{3R+r}\sin\left(mt - \dfrac{4\pi}{3} - \dfrac{\pi}{6}\right) \end{cases}$$

Уравненія (10) показываютъ:

1⁰ Три тока, производящіе работу, $i_{1,2}$, $i_{2,3}$, $i_{3,1}$ имѣютъ ту же фазу, какъ и напряженія e_{BA}, e_{CB}, e_{AC}; они представляютъ попарно разность фазъ $\frac{2\pi}{3}$ или 120 градусовъ.

2⁰ Общій максимумъ этихъ токовъ:

$$i_{max} = \frac{E\sqrt{2}}{3R+r}$$

и ихъ средняя эффективная:

$$(12)\ i_{ef} = \frac{E}{3R+r}$$

Это токъ, который произведетъ постоянная электровозбудительная сила E, дѣйствующая въ цѣпи съ сопротивленіемъ равнымъ сопротивленію одного изъ проводниковъ цѣпи пріемника плюсъ тройное сопротивленіе одной изъ проволокъ линіи.

Уравненія (11) показываютъ:

1° Три синусоидальные тока линіи i_1, i_2, i_3 представляютъ попарно разность фазъ $\frac{2\pi}{3}$ или 120 градусовъ.

2° i_1 опаздываетъ по отношенію къ $i_{1,2}$ на $\frac{\pi}{6}$ или 30°.

То же самое по отношенію i_2 къ $i_{2,3}$ и i_3 къ $i_{3,1}$

3° Максимумъ и средняя эффективная токовъ линіи i_1, i_2, i_3 относятся къ соотвѣтствующимъ величинамъ токовъ, производящихъ работу, $i_{1,2}, i_{2,3}, i_{3,1}$, какъ $\frac{\sqrt{3}}{1} = 1{,}73$

Средняя эффективная каждаго тока линіи равна току, который произведетъ электровозбудительная сила $E\sqrt{3}$, дѣйствующая въ цѣпи съ сопротивленіемъ равнымъ сопротивленію r одного изъ проводниковъ цѣпи пріемника плюсъ тройное сопротивленіе R одной изъ проволокъ линіи.

Пусть будетъ J эта средняя эффективная i_1, i_2, i_3.

$$(13)\quad J = i_e\sqrt{3}$$

4° Можно представить одинъ изъ токовъ, производящихъ работу, напр. $i_{3,1}$ въ видѣ:

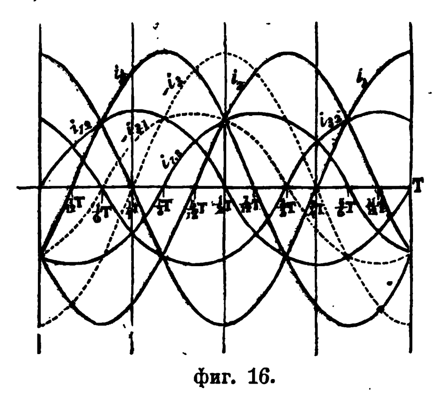
$$i_{3,1} = -\frac{E\sqrt{2}}{3R+r}\sin\left(mt - \frac{4\pi}{3} + \pi\right) =$$

$$(14)\quad -\frac{E\sqrt{2}}{3R+r}\sin\left(mt - \frac{\pi}{3}\right)$$

Можно, слѣдовательно, разсматривать равенства (10) и (11), какъ представляющія шесть токовъ съ разностью попарно въ 30°, какъ это указано на діаграммѣ (фиг. 16).

Напряженія e_{BA}, e_{CB}, e_{AC}, представлены сообразно масштабу тѣми же кривыми, какъ и $i_{1,2}, i_{2,3}, i_{3,1}$. Шесть

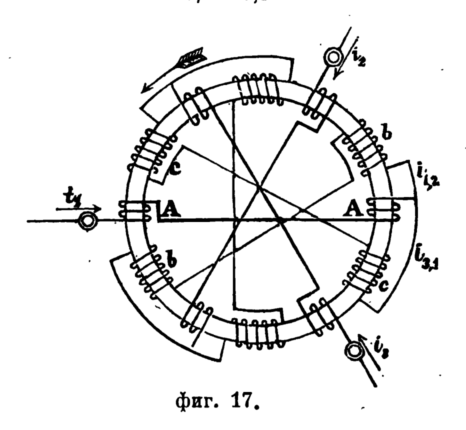
кривыхъ, о которыхъ идетъ рѣчь, суть: $i_{1,2}$, i_1, $-i_{3,1}$, $-i_3$, $i_{2,3}$, i_2. Этими шестью токами воспользовались, чтобы сдѣлать болѣе постоянными силу и скорость вращающагося поля.



фиг. 16.

На фиг. 17 изображена схема, принятая Доливо-Добровольскимъ: кольцеобразный индукторъ снабженъ 12 обмотками, питаемыми шестью токами съ разностью въ 30° или въ $^1/_{12}$ фазы.

Каждый токъ линіи, i_1 напримѣръ, проходитъ по обмоткѣ АА, потомъ раздѣляется на $i_{1,2}$, $i_{3,1}$, пробѣгая обмотки *bb*, *cc*, расположенныя съ одной и съ другой стороны АА. Такъ какъ отношеніе средней токовъ линіи i_1, i_2, i_3, къ средней токовъ $i_{1,2}$, $i_{2,3}$, $i_{3,1}$ равно отношенію $\sqrt{3}$ къ 1, то число оборотовъ обмотокъ А будетъ $\sqrt{3} = 1{,}73$ раза меньше числа оборотовъ обмотокъ *b* и *c*. Двѣнадцать обмотокъ производятъ въ кольцѣ два магнитные разноименные полюса, діаметрально противоположные и вращающіеся по направленію стрѣлки.



фиг. 17.

Вычисленіе линіи. — Мы уже видѣли, что токи въ проводникахъ цѣпи генератора совпадаютъ фазами съ соотвѣтствующими напряженіями.

Средняя эффективная каждаго изъ этихъ токовъ есть (ур. 12):

$$i_e = \frac{E}{3\,R + r}$$

Слѣдовательно, мощность въ цѣпи ABC:

$$(15) \qquad P = 3\,(E \times i_e) = \frac{3\,E^2}{3\,R + r} = EI$$

Предположивъ:

$$3\,i_e = I$$

I есть весь распредѣляемый токъ.

Слѣдовательно, мощность, расходуемая въ цѣпи работы:

$$(16)\ w = 3\,(i_e^2 r) = I^2 \times \frac{r}{3} = 3\,\frac{E^2}{3\,R + r} \times \frac{r}{3\,R + r}$$

Потеря мощности на линіи:

$$(17)\ W = 3\,(J^2 R) = 9\,i_e^2 R = I^2 R = \frac{3\,E^2}{3\,R + r} \times \frac{3\,R}{3\,R + r}$$

Уравненія (15), (16), (17) могутъ служить для провѣрки и показываютъ, что дѣйствительно:

$$P = w + W$$

Полезное дѣйствіе линіи будетъ слѣдовательно:

$$(18) \qquad \frac{w}{P} = \frac{r}{3\,R + r}$$

Эффективное напряженіе у зажимовъ каждаго элемента цѣпи пріемника будетъ:

$$(19) \qquad \varepsilon = \frac{w}{I} = E \times \frac{r}{3\,R + r} = i_e r = \frac{I}{3}\,r$$

Потеря напряженія на линіи:

$$(20)\quad r = \frac{W}{I} = E \times \frac{3\,R}{3\,R + r} = i_e \times 3\,R = IR$$

Пусть будетъ:

$$P = E\,I = E \times 3\,i_e$$

мощность у полюсовъ динамо или трансформатора отправленія и K процентная потеря на линіи. Имѣемъ:

$$W = K\,P = I^2\,R$$

Откуда:

$$r = KE$$

$$(21)\quad R = \frac{W}{I^2} = \frac{K\,P}{I^2} = \frac{K\,E}{I}$$

Пусть будетъ S l и ρ поперечное сѣченіе, длина и удѣльное сопротивленіе одной изъ проволокъ; имѣемъ:

$$R = \rho\,\frac{l}{S}$$

Откуда:

$$(22)\quad S = \frac{\rho\,l\,I^2}{W} = \frac{\rho\,l\,I^2}{K\,P} = \frac{\rho\,l\,I}{KE} = \frac{\rho\,l\,P}{KE^2}$$

Пусть будетъ V весь объемъ металла, употребленнаго на линіи, имѣемъ:

$$(23)\quad V = 3\,S\,l = \frac{3\,\rho\,l^2\,I^2}{W} = \frac{3\,\rho\,l^2\,I^2}{K\,P} = \frac{3\,\rho\,l^2\,I}{K\,E}$$

или

$$(24)\quad W = \frac{\rho\,l\,I^2}{S} = \frac{3\,\rho\,l^2\,I^2}{V}$$

Представимъ теперь мощность P въ видѣ переменнаго однофазнаго тока того же напряженія; будемъ имѣть еще:

$$P = EI$$

Распредѣлимъ объемъ металла V между двумя проволоками линіи одинаковой длины l; пусть будетъ R' сопротивленіе одной изъ этихъ проволокъ. Будемъ имѣть очевидно:

$$(25)\quad R' = \frac{\rho\, l}{1{,}5\ S} = \frac{2\rho l^2}{V}$$

и потеря W' мощности на линіи будетъ:

$$(26)\quad W' = 2\, R'\, I^2 = \frac{4\,\rho\, l^2\, I^2}{V}$$

Такимъ образомъ:

$$\frac{W'}{W} = \frac{4}{3} = 1{,}33 \text{ или } \frac{W}{W'} = \frac{3}{4} = 0{,}75$$

Слѣдовательно, для даннаго объема металла потеря на линіи, въ случаѣ трехфазнаго тока, на 25°/o меньше, чѣмъ при однофазномъ токѣ; среднее напряженіе между двумя какими нибудь проволоками линіи предполагается одинаковымъ для обоихъ случаевъ.

Формула (22) даетъ непосредственно поперечное сѣченіе одной изъ проволокъ и (21) ея сопротивленіе.

Равенство (26) показываетъ, что если сдѣлать $W' = W$, то нуженъ будетъ объемъ металла:

$$V' = \frac{4}{3}\, V$$

Слѣдовательно, экономія въ металлѣ, производимая трехфазнымъ токомъ по отношенію къ однофазному, равна 25°/o.

2. Соединеніе звѣздочкой.

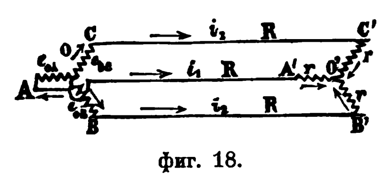
Пусть будетъ E средняя эффективная напряженій между точкою O и концами A, B, C цѣпи генератора, имѣемъ:

$$e_{OA} = E\sqrt{2}\sin mt$$

$$(1) \qquad e_{OB} = E\sqrt{2}\sin\left(mt - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_{OC} = E\sqrt{2}\sin\left(mt - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Линія питаетъ три цѣпи пріемника, имѣющія одинаковое сопротивленіе r и общую точку O′. Обозначимъ, какъ и раньше, чрезъ R сопротивленіе каждой проволоки линіи. Въ данномъ случаѣ мгновенный токъ въ каждой проволокѣ линіи равенъ току въ соотвѣтствующихъ проводникахъ генератора и пріемника.



фиг. 18.

Будемъ имѣть, очевидно, считая положительнымъ направленіемъ напряженій и токовъ направленіе, указываемое стрѣлками:

$$2\begin{cases} e_{OA} - e_{OB} = Ri_1 + ri_1 - ri_2 - Ri_2 = (R + r)(i_1 - i_2) \\ e_{OB} - e_{OC} = (R + r)(i_2 - i_3) \\ e_{OC} - e_{OA} = (R + r)(i_3 - i_1) \end{cases}$$

Такъ какъ три цѣпи имѣютъ точки O, O′ общими, то будемъ имѣть:

$$(3) \qquad i_1 + i_2 + i_3 = O.$$

Это послѣднее условіе показываетъ, что каждый токъ постоянно равенъ алгебраической суммѣ двухъ другихъ токовъ и имѣетъ знакъ противоположный ей.

Изъ равенствъ (1), (2) и (3) получаемъ:

$$(4) \qquad e_{OA} + e_{OB} + e_{OC} = 0.$$

$$(5) \qquad \begin{cases} e_{OA} = (R + r)\, i_1 \\ e_{OB} = (R + r)\, i_2 \\ e_{OC} = (R + r)\, i_3 \end{cases}$$

Откуда:

$$(6) \qquad \begin{cases} i_1 = \dfrac{E\sqrt{2}}{R + r} \sin mt \\ i_2 = \dfrac{E\sqrt{2}}{R + r} \sin\left(mt - \dfrac{2\pi}{3}\right) \\ i_3 = \dfrac{E\sqrt{2}}{R + r} \sin\left(mt - \dfrac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

Уравненія (6) показываютъ:

1°. Токи i_1, i_2, i_3 представляютъ попарно разность фазъ въ $^1/_3$ періода или 120° и ихъ фазы совпадаютъ съ соотвѣтствующими фазами напряженій въ проводникахъ генератора.

2°. Средняя эффективная J каждаго изъ этихъ токовъ равна:

$$(7) \qquad J = \frac{E}{R + r}$$

Это, слѣдовательно, токъ, который произведетъ постоянная электровозбудительная сила E или перемѣнная, имѣющая средней эффективной E, дѣйствующая въ цѣпи съ общимъ сопротивленіемъ $R + r$. Потеря напряженія въ одной какой нибудь проволокѣ линіи въ каждый моментъ равна $R\, i_t$; i_t есть мгновенный токъ. Данная линія дѣйствуетъ, какъ три отдѣльныхъ линіи, проводящихъ каждая однофазный токъ со среднею эффективною J и составленныхъ каждая изъ одной проволоки съ сопротивленіемъ R и обратнымъ проводомъ съ сопротивленіемъ равнымъ нулю.

3° Разность потенціаловъ между центрами O и O′ всегда равна нулю (ур. 5).

Въ результатѣ, соединеніе звѣздочкой представляетъ собою трехфазную линію, равнозначущую тремъ обыкновеннымъ линіямъ, проводящимъ три однофазные тока, отодвинутые попарно на $^1/_3$ періода, при чемъ три обратныхъ проволоки, имѣющія потенціалы съ разностью фазъ попарно также въ $^1/_3$ періода, замѣнены одною проволокою. Если, какъ мы предположили, три отдѣльныя линіи нагружены одинаково, то въ такомъ случаѣ по обратному общему проводнику не будетъ совершенно проходить тока, а слѣдовательно этотъ проводникъ можетъ быть уничтоженъ.

Разность потенціаловъ у зажимовъ двухъ какихъ нибудь концовъ, напримѣръ A, B, цѣпи генератора будетъ имѣть своимъ выраженіемъ:

$$e_{OA} - e_{OB} = E\sqrt{2}\left[\sin mt - \sin\left(mt - \frac{2\pi}{3}\right)\right]$$

$$= E\sqrt{3}\sqrt{2}\sin\left(mt + \frac{\pi}{6}\right)$$

Средняя эффективная равна $E\sqrt{3}$; она составляетъ 1,73 напряженія E каждой изъ вѣтвей звѣздочки.

Вычисленіе линіи.—Пусть будетъ:

$$P = 3\ EJ = EI = 3\ \frac{E^2}{R + r}$$

мощность въ началѣ линіи; мы видѣли, что токи имѣютъ тѣ же фазы, какъ и ихъ соотвѣтствующія напряженія.

Мощность, расходуемая въ цѣпи пріемника:

$$(8) \qquad w = 3\ J^2\ r = 3\ \frac{E^2}{(R + r)^2}\ r = \frac{1}{3} I^2\ r$$

Мощность, расходуемая на линіи:

$$(9) \qquad W = 3\ J^2\ R = \frac{1}{3}\ I^2 R = 3\ \frac{E^2}{(K + r)^2} \times R.$$

Потеря напряженія на линіи:

$$(10) \qquad v = \mathrm{JR} = \frac{1}{3}\,\mathrm{RI}$$

Если обозначимъ чрезъ S, l, ρ поперечное сѣченіе, длину и удѣльное сопротивленіе каждой проволоки линіи, то будемъ имѣть при извѣстныхъ величинахъ W и v:

$$\mathrm{R} = \frac{3\,\mathrm{W}}{\mathrm{I}^2} = \frac{3v}{\mathrm{I}} = \rho\,\frac{l}{\mathrm{S}}$$

$$(11) \qquad \mathrm{S} = \frac{1}{3}\,\rho\,\frac{l\mathrm{I}^2}{\mathrm{W}} = \frac{1}{3}\,\rho\,\frac{l\,\mathrm{I}}{v}$$

Если предположимъ, что:

$$v = \mathrm{KE} \qquad \mathrm{W} = \mathrm{KP}$$

то будемъ имѣть:

$$(12) \qquad \mathrm{S} = \frac{1}{3}\,\rho\,\frac{l\,\mathrm{I}^2}{\mathrm{KP}} = \frac{1}{3}\,\frac{\rho l\,\mathrm{I}}{\mathrm{K\,E}} = \frac{1}{3}\,\frac{\rho l\,\mathrm{P}}{\mathrm{KE}^2}$$

Пусть будетъ V весь объемъ металла линіи, тогда:

$$(13) \qquad \mathrm{W} = \rho\,\frac{l^2\,\mathrm{I}^2}{\mathrm{V}}$$

$$(14) \qquad v = \rho\,\frac{l^2\,\mathrm{I}}{\mathrm{V}}$$

Если сравнимъ уравненіе (13) съ уравненіемъ (24) на стр. 32, то увидимъ, что при одинаковыхъ величинахъ E, I и V (или S) потеря, въ случаѣ соединенія звѣздочкой, составляетъ только $^1/_3$ потери происходящей при соединеніи треугольникомъ; слѣдовательно, экономія мѣди при соединеніи звѣздочкой сравнительно съ соединеніемъ треугольникомъ равна $^2/_3$ или 66%.

Уравненіе (26) показываетъ, что экономія при соединеніи звѣздочкой сравнительно съ однофазной линіей составляетъ $^3/_4$ или 75%.

Въ предшествующемъ предполагалось, что никакія соображенія не препятствуютъ увеличенію напряженія между

проволоками линіи въ отношеніи 1,73 : 1; каковой случай представляется, напримѣръ, при вторичной канализаціи для питанія лампъ.

Если же, наоборотъ, имѣемъ первичную линію высокаго напряженія, то условія изоляціи требуютъ, чтобы въ различныхъ разсмотренныхъ случаяхъ среднее напряженіе между проволоками линіи было одинаково.

Въ случаѣ соединенія звѣздочкой, каждая цѣпь OA и т. п. должна производить, слѣдовательно, напряженіе E' такое, чтобы:

$$(15) \qquad E'\sqrt{3} = E \qquad\qquad E' = \frac{E}{1{,}73}$$

Вслѣдствіе чего, для той же первоначальной мощности

$$(16) \qquad J' = J\sqrt{3} \qquad\qquad I' = I\sqrt{3}$$

и для той же потери W въ уаттахъ и относительной потери v въ вольтахъ

$$(17) \qquad v' = KE' = K\frac{E}{\sqrt{3}}$$

Имѣемъ слѣдовательно:

$$(18) \qquad \begin{cases} S' = \dfrac{1}{3}\rho\dfrac{lI'^2}{W} = \dfrac{1}{3}\rho\dfrac{lI'}{\dfrac{KE}{\sqrt{3}}} \\[2ex] S' = \dfrac{\rho l I}{KE} = \dfrac{\rho l I}{v'} = \dfrac{\rho l P}{KE^2} \end{cases}$$

Это уравненіе тождественно съ формулой (22) стр. 32, Поперечное сѣченіе проволокъ первичной линіи будетъ, слѣдовательно, одинаково въ соединеніи звѣздочкой и въ соединеніи треугольникомъ.



фиг. 19.

Смѣшанное соединеніе. Предположимъ, что цѣпь

генератора имѣетъ соединеніе звѣздочкой, а цѣпь пріемника соединеніе треугольникомъ.

Пусть будетъ, какъ и раньше:

$$(1)\begin{cases} e_{OA} = E\sqrt{2}\sin mt \\ e_{OB} = E\sqrt{2}\sin\left(mt - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_{OC} = E\sqrt{2}\sin\left(mt - \frac{4\pi}{3}\right) \\ e_{OA} + e_{OB} + e_{OC} = 0. \end{cases}$$

$$(2)\begin{cases} e_{OA} - e_{OB} = R(i_1 - i_2) + r\, i_{1,2} \\ e_{OB} - e_{OC} = R(i_2 - i_3) + r\, i_{2,3} \\ e_{OC} - e_{OA} = R(i_3 - i_1) + r\, i_{3,1} \end{cases}$$

Откуда:

$$(3)\qquad i_{1,2} + i_{2,3} + i_{3,1} = 0.$$

Имѣемъ очевидно:

$$(4)\begin{cases} i_1 = i_{1,2} - i_{3,1} \\ i_2 = i_{2,3} - i_{1,2} \\ i_3 = i_{3,1} - i_{2,3} \end{cases}$$

$$(5)\qquad i_1 + i_2 + i_3 = 0.$$

Изъ (3) и (4) получаемъ:

$$(6)\begin{cases} i_1 - i_2 = 3\, i_{1,2} \\ i_2 - i_3 = 3\, i_{2,3} \\ i_3 - i_1 = 3\, i_{3,1} \end{cases}$$

Изъ (2), (6) и (1) имѣемъ:

$$(7)\begin{cases} i_{1,2} = \frac{E\sqrt{2}}{3R + r}\left[\sin mt - \sin\left(mt - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \\ \qquad = \frac{E\sqrt{3}\sqrt{2}}{3R + r}\sin\left(mt + \frac{\pi}{6}\right) \\ i_{2,3} = \frac{E\sqrt{2}}{3R + r}\left[\sin\left(mt - \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(mt - \frac{4\pi}{3}\right)\right] \end{cases}$$

$$(7)\begin{cases} \qquad = \dfrac{E\sqrt{3}\sqrt{2}}{3R+r}\sin\left(mt-\dfrac{2\pi}{3}+\dfrac{\pi}{6}\right) \\ i_{3,1} = \dfrac{E\sqrt{2}}{3R+r}\left[\sin\left(mt-\dfrac{4\pi}{3}\right)-\sin mt\right] \\ \qquad = \dfrac{E\sqrt{3}\sqrt{2}}{3R+r}\sin\left(mt-\dfrac{4\pi}{3}+\dfrac{\pi}{6}\right) \end{cases}$$

(4) и (7) даютъ:

$$(8)\begin{cases} i_1 = \dfrac{3E\sqrt{2}}{3R+r}\sin mt = \dfrac{3e_{OA}}{3R+r} \\ i_2 = \dfrac{3E\sqrt{2}}{3R+r}\sin\left(mt-\dfrac{2\pi}{3}\right) = \dfrac{3e_{OB}}{3R+r} \\ i_3 = \dfrac{3E\sqrt{2}}{3R+r}\sin\left(mt-\dfrac{4\pi}{3}\right) = \dfrac{3e_{OC}}{3R+r} \end{cases}$$

Токи линіи i_1, i_2, i_3 имѣютъ, слѣдовательно, среднюю эффективную:

$$(9) \qquad i_e = \frac{3E}{3R+r}$$

Средняя эффективная токовъ работы:

$$(10) \qquad J = \frac{E}{3R+r}\sqrt{3}.$$

Откуда:

$$(11) \qquad i_e = J\sqrt{3} = J \times 1{,}73$$

Изъ приведенныхъ вычисленій слѣдуетъ:

1. Токи линіи i_1, i_2, i_3 имѣютъ одинаковую фазу съ соотвѣтствующими имъ напряженіями.

2. Средняя эффективная каждаго изъ этихъ токовъ составляетъ 1,73 средней эффективной каждаго тока работы.

3. Каждый отдѣльный токъ работы совпадаетъ своею фазою съ разностью потенціаловъ у зажимовъ двухъ проволокъ линіи, которыя онъ пересѣкаетъ (ур. 7).

Вычисленіе линіи.—Пусть будетъ:

$$I = 3\,J$$

весь токъ цѣпи пріемника. Мощность въ концѣ линіи будетъ:

$$(12)\quad \begin{cases} P = 3\,E\,J\sqrt{3} = 3\,J\,E\sqrt{3} = I\,E\sqrt{3} \\ = \dfrac{3\,E\sqrt{3}}{3\,R + r} \times E\sqrt{3} = \dfrac{9\,E^2}{3\,R + r} \end{cases}$$

Мощность, расходуемая въ цѣпи пріемника:

$$(13)\qquad w = 3\,J^2\,r = \frac{9\,E^2}{3\,R + r} \times \frac{r}{3\,R + r}$$

Потеря въ уаттахъ на линіи выразится:

$$(14)\quad W = 3\,R\,(J\sqrt{3})^2 = 9\,R\,J^2 = R\,I^2 = \frac{9\,E^2}{3R + r} \times \frac{3\,R}{3\,R + r}$$

Положимъ:

$$W = K\,P = K\,I\,E\sqrt{3}.$$

Будемъ имѣть:

$$(15)\qquad R = \frac{W}{I^2} = \frac{KIE\sqrt{3}}{I^2} = \frac{KE\sqrt{3}}{I}$$

$E\sqrt{3}$ есть средняя эффективная напряженія между двумя проволоками линіи отправленія.

Можно прійти къ тому же результату другимъ способомъ. Въ самомъ дѣлѣ, изъ уравненій (1), (2) и (6) получаемъ напряженіе ri въ данный моментъ у зажимовъ какого-либо элемента цѣпи пріемника. Такъ напримѣръ:

$$(16)\qquad ri_{1,2} = E\sqrt{3}\sqrt{2}\,\sin\left(mt + \frac{\pi}{6}\right) - 3\,R\,i_{1,2}$$

$i_{1,2}$ имѣетъ ту же фазу, какъ и напряженіе между двумя проволоками 1 и 2. Средняя потеря напряженія на линіи будетъ, слѣдовательно:

$$(17) \qquad v = 3RJ = RI = 3R\frac{E\sqrt{3}}{3R + r}$$

И такъ потеря напряженія на линіи равна произведенію сопротивленія R проволоки линіи на весь токъ работы I.

Имѣемъ, слѣдовательно:

$$(18) \qquad R = \frac{v}{I}$$

Изъ равенствъ (15) и (18):

$$v = KE\sqrt{3}$$

Поперечное сѣченіе проволоки будетъ:

$$(19) \qquad S = \frac{\rho l}{R} = \frac{\rho l I^2}{W} = \frac{\rho I l}{v} = \frac{1}{3}\frac{\rho l P}{KE^2} \text{ и } v = \frac{\rho l I}{S}$$

I это весь токъ работы, но не токъ линіи, который имѣеетъ выраженіемъ $I\sqrt{3}$.

Если E будетъ обозначать напряженіе между двумя проволоками линіи, то формула (19) обратится въ:

$$S' = \frac{\rho l P}{KE^2}$$

Въ случаѣ тока однофазнаго, допустивъ то же напряженіе $E\sqrt{3}$ и тотъ же вѣсъ металла, будемъ имѣть потерю напряженія:

$$v' = \frac{4}{3}\frac{\rho l I}{S} = \frac{4}{3}v$$

или для той же потери v:

$$S' \frac{2\rho l I}{v} = 2S$$

Объемы металла будутъ, слѣдовательно, въ отношеніи:

$$\frac{v}{v'} = \frac{3\,S\,l}{2 \times 2\,S\,l} = \frac{3}{4} = 0{,}75$$

Итакъ трехфазная линія при одинаковомъ напряженіи и при одинаковой потерѣ даетъ 25% экономіи въ металлѣ сравнительно съ линіей однофазной.

Нѣкоторыя замѣчанія относительно различныхъ системъ передачи и распредѣленія электрической энергіи по отношенію къ канализаціи.

Мы допустили во всемъ предшествовавшемъ, что проводники и цѣпи пріемника были лишены самоиндукціи и электроемкости.

Предположимъ теперь, что цѣпи не имѣютъ электроемкости, но что пріемники, особенно пріемники электродвигателей, даютъ мѣсто явленіямъ самоиндукціи. Въ такомъ случаѣ результаты, полученные нами выше, должны быть въ нѣкоторой степени измѣнены.

Разсмотримъ пріемникъ съ сопротивленіемъ r и коеффиціентомъ самоиндукціи L, питаемый однофазнымъ токомъ съ числомъ перемѣнъ n, среднее напряженіе котораго равно E. Будемъ имѣть:

$$I = \frac{E}{\sqrt{r^2 + (2\,\pi n\,L)^2}} = \frac{E}{r\sqrt{1 + \left(\frac{2\,\pi n\,L}{r}\right)^2}}$$

Вмѣстѣ съ тѣмъ фаза тока будетъ запаздывать относительно фазы напряженія на уголъ φ, опредѣляемый отношеніемъ:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{2\,\pi n\,L}{r}$$

такимъ образомъ, мощность, дѣйствительно поглощенная пріемникомъ, будетъ:

$$(1) \qquad P = E\,I\cos\varphi$$

Произведеніе $EI = P'$ среднихъ эффективныхъ напряженія и силы тока есть то, что называютъ кажущеюся поглощаемою мощностью или кажущимися уаттами, если только E и I выражены соотвѣтственно въ вольтахъ и амперахъ:

Пусть будетъ I' токъ, который произведетъ E при сопротивленіи безъ самоиндукціи и при условіи, что:

$$(2) \qquad E\,I' = P = E\,I \cos\varphi = P' \cos\varphi$$

Отсюда выводимъ:

$$I' = I\cos\varphi \qquad\qquad I = \frac{I'}{\cos\varphi}$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{P'}$$

Приводимъ нѣкоторые результаты, полученные при употребленіи однофазнаго двигателя въ 30 лошадиныхъ силъ:

Число оборотовъ въ минуту	730
Эффективная работоспособность двигателя въ лошадяхъ	30,7
Кажущаяся поглощенной мощность въ вольтъ-амперахъ	29,800
Дѣйствительно поглощенная мощность, измѣренная уаттометромъ	27,700

Отношеніе дѣйствительной мощности къ кажущейся будетъ:

$$\frac{P}{P'} = \cos\varphi = 0{,}92.$$

Мы примемъ въ послѣдующемъ, что въ среднемъ $\cos\varphi = 0{,}90$, которому соотвѣтствуетъ $\varphi = 26^0$; возьмемъ за сопротивленіе $\rho = 18$ омамъ, сопротивленіе одного километра проволоки въ 1^{mm^2} поперечнаго сѣченія, и выразимъ l въ километрахъ.

Установка звѣздочкой. Токи J и I должны быть замѣнены токами:

$$J' = \frac{J}{0,90} \qquad I' = \frac{I}{0,90}$$

Если E среднее напряженіе каждой вѣтви цѣпи генератора, то поперечное сѣченіе проволоки линіи будетъ:

$$(11)\ bis \qquad S = \frac{1}{3} \times \frac{18\, l\, I'^2}{W} = \frac{1}{3} \times \frac{18\, l\, I^2}{(0,90)\, W}$$

$$\frac{1}{3} \times \frac{18\, l\, I}{0,90\, v} = 6,67\, \frac{l\, P}{KE^2}$$

Если же E выражаетъ наоборотъ напряженіе между двумя проволоками линіи, то необходимо замѣнить въ предшествующей формулѣ E чрезъ $\frac{E}{\sqrt{3}}$ и I черезъ $I\sqrt{3}$; тогда будемъ имѣть:

$$(19)\ bis \qquad S' = \frac{20\, l\, P}{KE^2}$$

Въ случаѣ постояннаго тока имѣли бы:

$$S_1 = \frac{2\, \rho\, l\, P}{KE^2} = \frac{36\, l\, P}{KE^2}$$

Пусть V' и V_1 обозначаютъ объемы мѣди трехфазной линіи и линіи постояннаго тока, имѣемъ:

$$(\alpha) \qquad \frac{V'}{V_1} = \frac{3\, S'\, l}{2\, S_1\, l} = \frac{60}{72} = 0,833.$$

Это отношеніе показываетъ, что для вычисленія трехфазной линіи можно вычислить сначала линію постояннаго тока той же длины, проводящую токъ EI при потерѣ W въ уаттахъ или v въ вольтахъ, затѣмъ уменшить общій вѣсъ мѣди на 16% и остальной металлъ равномѣрно распредѣлить между тремя проволоками.

Установка треугольникомъ. Токи, составляющіе цѣпь пріемника, запаздываютъ на уголъ φ, также какъ и каждый изъ токовъ линіи, который постоянно равенъ алгебраической разности двухъ токовъ работы, упирающихся въ него. Поперечное сѣченіе проволоки линіи опредѣлится, слѣдовательно, формулою:

$$S = \frac{18\,l}{W}\left(\frac{I}{0{,}90}\right)^2 = \frac{20\,l\,I}{v} = \frac{20\,l\,P}{KE^2}$$

гдѣ I выражаетъ постоянный токъ, имѣющій величину равную $\frac{P}{E}$.



ВТОРАЯ ЧАСТЬ.

Генераторы многофазныхъ токовъ.

ГЛАВА IV.

Полученіе многофазныхъ токовъ.

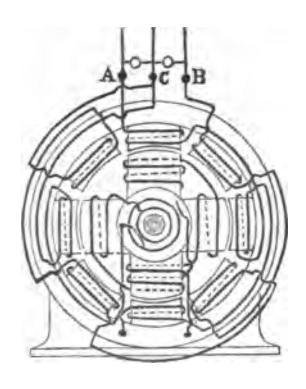
Установимъ два одинаковые однофазные альтернатора такъ, чтобы оси ихъ составляли продолженіе одна другой и соединимъ ихъ муфтою такимъ образомъ, чтобы одинъ изъ альтернаторовъ представлялъ по отношенію къ другому запозданіе въ фазѣ на $^1/_4$ періода. Такая система двухъ динамо составитъ генераторъ двухфазнаго тока.

Хотя подобное приспособленіе немного сложно и стоитъ дорого, но оно представляетъ то преимущество, что позволяетъ легко регулировать напряженіе каждаго изъ двухъ токовъ, какъ на станціи отправленія, такъ и въ любой точкѣ на линіи. Это регулированіе можно производить также, какъ и въ случаѣ двухъ альтернаторовъ соединенныхъ параллельно, посредствомъ двухъ реостатовъ, ручныхъ или автоматическихъ, дѣйствующихъ на оба тока индукторовъ. Такимъ образомъ, можно уравновѣсить неравенство напряженій, могущихъ произойти отъ неодинаковой нагрузки двухъ линій, вслѣдствіе воздѣйствій арматуры и сопротивленія линіи.

Такое регулированіе достигаетъ вполнѣ своей цѣли въ установкахъ электрическаго освѣщенія; но чтобы можно

было то же сказать, когда требуется передача электрической энергіи, то необходимо, чтобы два соединенные альтернатора имѣли самую слабую самоиндукцію. Въ противномъ случаѣ значительная разница въ нагрузкѣ двухъ линій можетъ на столько измѣнить разность фазъ двухъ альтернаторовъ, что эта послѣдняя уклонится въ ту или другую сторону отъ своей нормальной величины 1/4 періода и этимъ нарушитъ образованіе двухфазнаго тока.

Возможно упростить подобную установку и сдѣлать ее болѣе компактной, сохранивъ въ то же время преимущество регулированія каждаго тока отдѣльно. Для этого устанавливаютъ обѣ арматуры на одномъ остовѣ и оба индуктора на одной и той же оси или обратно. Соединивши посредствомъ муфты ось такой машины съ машиной возбудителемъ, мы получимъ полный генераторъ двухфазнаго тока.



фиг. 20.

На фиг. 20 изображена схема альтернатора, производящаго два тока, отодвинутые на 1/4 періода. Этотъ альтернаторъ имѣетъ только одинъ индукторъ. Каждому индуктирующему полюсу соотвѣтствуютъ двѣ индукціонныхъ катушки. Рисунокъ показываетъ, что обѣ индукціонныя цѣпи соединены вмѣстѣ въ точкѣ C средней проволоки линіи.

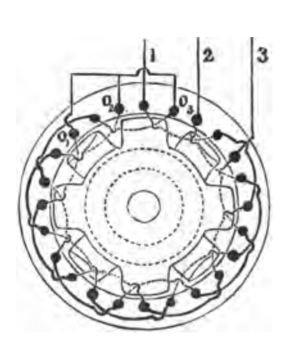
Аналогичнымъ образомъ можно построить трехфазный альтернаторъ, но тогда каждому индуктирующему полюсу должны соотвѣтствовать три индукціонныхъ катушки. Если, слѣдовательно, n есть число индуктирующихъ полюсовъ, то арматура должна имѣть $3n$ катушекъ. Пусть будетъ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ...... $3n-2$, $3n-1$, $3n$ послѣдовательныя индукціонныя катушки, обмотанныя всѣ одинаково. Если хотятъ получить 3 тока, разнящіеся попар-

но на 1/3 періода, то группирують катушки, согласно ниже приводимой табличкѣ:

1-я цѣпь	1—4—7 . .	$3n-2$
2-я »	3—6 . .	$(3n-3)-3n$
3-я »	5—8 . .	$(3n-1)-2$

Для того чтобы получить открытое соединеніе, т. е. соединеніе звѣздочкой въ томъ случаѣ, когда динамо даетъ непосредственно напряженіе тока линіи, то соединяютъ начала трехъ цѣпей съ проволоками линіи, а концы этихъ цѣпей въ одну точку. Эта общая точка сообщается съ землею или же соединяется съ четвертой проволокой.

Арматура трехфазнаго генератора Броуна неподвижна. Сердечникомъ ей служитъ кольцо изъ листоваго желѣза; въ этомъ кольцѣ сдѣланы отверстія очень близкія къ внутренней поверхности; въ отверстія вкладываются мѣдныя полосы, оправленныя въ азбестъ и связанныя, какъ это указано на рис. 21. Эти полосы соединены вмѣстѣ однимъ изъ концовъ, какъ въ динамо Томсона-Хустона.



фиг. 21.

Каждому индуктирующему полюсу соотвѣтствуютъ три полосы арматуры. Индукторъ, вращающійся внутри арматуры, отличается интересною конструкціей. Цилиндрическій желѣзный сердечникъ, расположенный концентрически относительно оси динамо, снабженъ только одною обмоткою. Къ этому сердечнику съ обѣихъ сторонъ привинчено по диску изъ литой стали, изъ которыхъ каждый имѣетъ на своей окружности зубцы, представляющіе собою выпуклости по направленію радіусовъ. Эти диски помѣщаются такъ, что система зубцовъ одного диска входитъ какъ разъ въ выемки другаго диска. При пропусканіи тока по обмоткѣ, окружающей сердечникъ,

эти зубцы обращаются въ полюсныя оконечности попеременно противуположнаго знака. Такое устройство, напоминающее индукторъ альтернатора Мордея, значительно уменьшаетъ требуемое машиной возбужденіе.

Динамо Броуна предназначена для производства токовъ большой силы и слабаго напряженія, которые преобразуются передъ отправкою на линію въ токи высокаго напряженія посредствомъ трансформатора, находящагося здѣсь-же возлѣ генератора.

Произведенныя надъ этою динамо испытанія показали, что нахожденіе внутри самаго сердечника индукціонныхъ полосъ значительнаго поперечнаго сѣченія устраняетъ появленіе въ этихъ проводникахъ вихровыхъ токовъ.

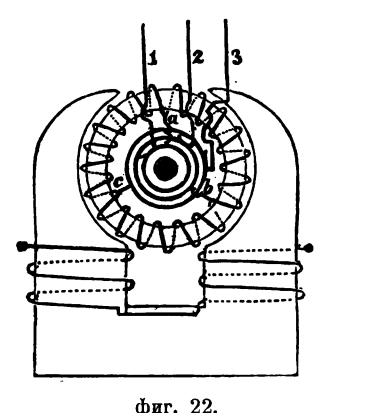
Приводимъ ниже нѣсколько числовыхъ данныхъ, относящихся къ генератору Броуна, построенному въ мастерскихъ Эрликона для передачи электрической энергіи отъ Лауфена до Франкфуртской выставки:

Мощность, поглощенная динамо	300	лош.	силъ.
Число оборотовъ въ минуту	150	»	»
Число индуктирующихъ полюсовъ . . .	32	»	»
Число перемѣнъ тока.	40	»	»
Число индукціонныхъ полосъ на каждую цѣпь	32	»	»
Все число полосъ	96	»	»
Діаметръ индукціонныхъ полосъ . . .	29	миллим.	
Эффективная сила каждой цѣпи	1400	амперовъ.	
Эффективное напряженіе каждой цѣпи.	50	вольтовъ.	

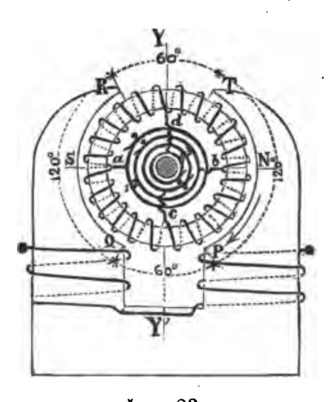
Посредствомъ незначительныхъ измѣненій въ обыкновенной динамо постояннаго тока, можно также получить отодвинутые токи. Разсмотримъ, напримѣръ, динамо Грамма съ двумя полюсами; прикрѣпимъ на продолженіи оси машины три металлическія изолированныя кольца и соединимъ ихъ посредствомъ проволокъ съ тремя точками *a*, *b*, *c* обмотки, находящимися на разстояніи 120 градусовъ другъ отъ друга. Мы получимъ, такимъ образомъ,

три напряженія, представляющія попарно разность фазъ въ $^1/_3$ періода. Индукторъ можетъ быть возбуждаемъ отдѣльною машиною или же постояннымъ токомъ, собираемымъ на обыкновенномъ коллекторѣ динамо.

Разсмотримъ еще динамо постояннаго тока, и соединимъ двѣ пары колецъ, прикрѣпленныхъ къ оси машины съ четырьмя точками *a*, *b*, *c*, *d* обмотки арматуры, напримѣръ машины Грамма, расположенными на концахъ взаимно перпендикулярныхъ діаметровъ. Пара колецъ 1, 2 соединена съ двумя діаметрально противоположными точками *a*, *b*; другая пара колецъ соединена съ точками *c*, *d*. Токи собираются посредствомъ четырехъ щетокъ, соприкасающихся съ кольцами.




фиг. 22.



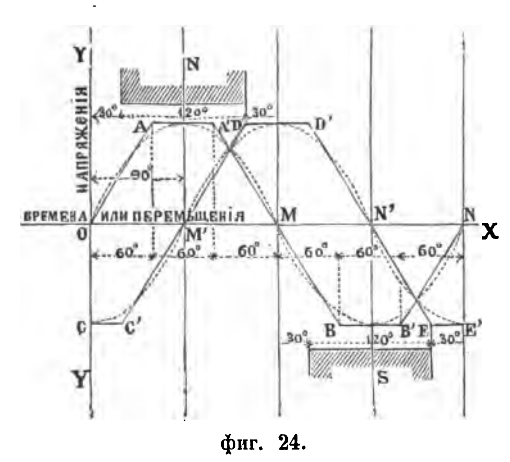
фиг. 23.

Возбуждая индукторъ отдѣльною машиною или же постояннымъ токомъ, собираемымъ на обыкновенномъ коллекторѣ динамо, мы получимъ, очевидно, на двухъ парахъ колецъ два напряженія, представляющія отодвинутіе фазъ на $^1/_4$ періода.

Чтобы дать себѣ отчетъ въ дѣйствіи подобной машины, мы допустили, какъ это указано на схемѣ рис. 22 и 23, что уголъ, обнимаемый каждой полюсной частью, равенъ 120 градусамъ. Вообразимъ, что арматура и индуктирующіе полюсы развернуты и разсмотримъ одну половину

b c a арматуры. Въ такомъ случаѣ воображаемое движеніе кольца будетъ прямолинейнымъ и равномѣрнымъ.

Предположимъ сначала, что линіи силъ направлены лучами и равномѣрно распредѣлены между полюсными частями и кольцомъ и что въ междуполюсномъ пространствѣ чрезъ это послѣднее не проходитъ линій силъ. При такомъ предположеніи и при разомкнутой цѣпи діаграммою напряженія между двумя точками *a* и *b* для одного оборота арматуры будетъ, очевидно, ломанная линія OAA′MBB′N. Прямая YOY′ представляетъ ось обмотки *a c b* въ моментъ, когда эта ось совпадаетъ съ нейтраль-



фиг. 24.

ною линіей. Обмотка вращается по направленію стрѣлки; напряженіе между *a* и *b* увеличивается равномѣрно, слѣдуя по прямой OA; точка A соотвѣтствуетъ моменту, когда точка *b* становится передъ краемъ P. Затѣмъ точка *b* проходитъ отъ P къ Q и напряженіе дѣлается постояннымъ; его діаграмма AA′ и есть именно та діаграмма, которую дала-бы динамо, дѣйствующая, какъ генераторъ постояннаго тока. Далѣе, напряженіе уменьшается по линіи A′M и обращается въ нуль, когда діаметръ *a b* совпадетъ съ NS. Въ продолженіи слѣдующаго полуоборота напряженіе между *a* и *b* мѣняетъ знакъ и тогда діаграммой

напряженія будетъ линія MBB'N. Другая половина $a\,d\,b$ арматуры даетъ, очевидно, ту же діаграмму OAA'MBB'N. Можно видѣть также, что напряженіе между точками c и d для одного оборота будетъ имѣть діаграмму CC'M'DD'N'EE'.

Въ дѣйствительности въ промежуткѣ между полюсами плотность линій силъ, пронизывающихъ арматуру, не будетъ равна нулю; въ разомкнутой цѣпи эта плотность увеличивается, начиная отъ нейтральной линіи до средины полюсныхъ частей машины; дѣйствительными діаграммами для разомкнутой цѣпи будутъ кривыя, аналогичныя означеннымъ на рисункѣ пунктиромъ и разнящіяся очень мало, въ разсматриваемомъ примѣрѣ, отъ синусоидъ.

Мы видимъ, что ордината максимумъ этихъ діаграммъ представляетъ собою электровозбудительную силу E_m, которую произвела бы динамо, дѣйствующая какъ генераторъ постояннаго тока; эффективное напряженіе каждой цѣпи двухфазнаго генератора будетъ, слѣдовательно:

$$(1) \qquad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0{,}7\ E_m$$

Это напряженіе на 30% меньше напряженія постояннаго тока, который даетъ динамо на щеткахъ своего обыкновеннаго коллектора.

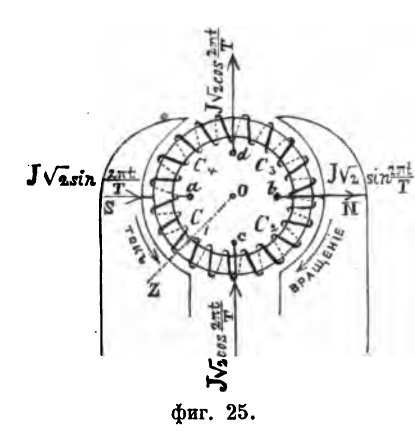
Замкнемъ теперь двѣ пары щетокъ 1, 2, 3, 4 двумя цѣпями съ равными сопротивленіями r. Пусть будетъ J средняя эффективная каждаго тока; силы токовъ въ моментъ t, беря за начало времени моментъ, когда $i_1 = o$, будутъ имѣть выраженіями:

$$(2) \qquad i_1 = J\sqrt{2}\sin\frac{2\pi t}{T}$$

$$(3) \qquad i_2 = -J\sqrt{2}\cos\frac{2\pi t}{T}$$

Замѣтимъ еще, что за начало времени взятъ именно тотъ моментъ, когда діаметръ $a\,b$ совпадаетъ съ осью по-

люсовъ, такъ какъ при такомъ положеніи напряженіе между точками *a* и *b* равно нулю. Нужно сказать, что направленіе оси полюсовъ можетъ, вслѣдствіе воздѣйствія арматуры на поле, уклоняться отъ направленія прямой NS, соединяющей средины полюсовъ.



фиг. 25.

Пусть будетъ C_1, C_2, C_3, C_4 токи, проходящіе въ моментъ t по четыремъ секціямъ *ad*, *db*, *bc*, *ca* арматуры, причемъ направленіе токовъ будемъ считать положительнымъ, когда они проходятъ секціи по направленію стрѣлки и отрицательнымъ въ обратную сторону.

Будемъ имѣть, очевидно:

$$(4) \qquad C_1 - C_4 = C_2 - C_3 = J\sqrt{2}\sin\frac{2\pi t}{T}$$

$$(5) \qquad C_4 - C_3 = C_1 - C_2 = -J\sqrt{2}\cos\frac{2\pi t}{T}$$

Откуда:

$$(6) \qquad C_1 - C_3 = J\sqrt{2}\left(\sin\frac{2\pi t}{T} - \cos\frac{2\pi t}{T}\right)$$

$$(7) \qquad C_2 - C_4 = J\sqrt{2}\left(\sin\frac{2\pi t}{T} + \cos\frac{2\pi t}{T}\right)$$

Будемъ имѣть на основаніи симметріи:

$$(8) \qquad C_3 = -C_1$$

$$(9) \qquad C_4 = -C_2$$

Слѣдовательно:

$$(10) \qquad C_1 - C_3 = 2C_1 = J\sqrt{2}\left(\sin\frac{2\pi t}{T} - \cos\frac{2\pi t}{T}\right)$$

$$(11) \quad C_2 - C_4 = 2\,C_2 = J\sqrt{2}\left(\sin\frac{2\pi t}{T} + \cos\frac{2\pi t}{T}\right)$$

или:

$$(12)\ C_1 = \frac{J\sqrt{2}}{2}\sqrt{2}\sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi}{4}\right) = J\sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi}{4}\right)$$

$$(13) \quad C_2 = J\sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \frac{\pi}{4}\right)$$

Эффективная сила тока въ обмоткѣ равна:

$$\frac{J}{\sqrt{2}}$$

Пусть будетъ I нормальная величина всего постояннаго тока, который могла бы дать динамо; по обмоткѣ пройдетъ токъ $\frac{I}{2}$; если, хотятъ, чтобы потеря въ уаттахъ въ проволокахъ арматуры, а также, слѣдовательно, производимое нагрѣваніе были одинаковыми какъ при постоянномъ токѣ, такъ и при двухфазномъ, то необходимо имѣть:

$$\frac{J}{\sqrt{2}} = \frac{I}{2}$$

или:

$$(14) \quad J = \frac{I}{\sqrt{2}} = 0{,}7\ I$$

Слѣдовательно, если имѣемъ динамо постояннаго тока, дающую E_m вольтовъ и I амперовъ, *арматура которой имѣетъ лишь слабую самоиндукцію, могущую быть уравновѣшенной возбужденіемъ*, то такая динамо можетъ дать два тока, отодвинутые на $^1/_4$ періода и имѣющіе каждый напряженіе:

$$E = 0{,}7\ E_m$$

и силу:

$$J = 0,7\,I.$$

Иначе говоря, чтобы сдѣлать, въ случаѣ аналогичномъ выбранному нами примѣру, расчетъ генератора, способнаго дать два тока, отодвинутыхъ на $^1/_4$ періода, напряженія E и силы J, можно взамѣнъ вычислить динамо постояннаго тока напряженія $E\sqrt{2}$ и силы $J\sqrt{2}$.

Если токъ для возбужденія собирается на обыкновенномъ коллекторѣ динамо, то онъ будетъ имѣть напряженіе $E\sqrt{2} = 1,41\,E$.

Кромѣ того, если цѣпи работы представляютъ собою простыя сопротивленія безъ самоиндукціи, то мощность динамо будетъ одинакова для обоихъ случаевъ, такъ какъ имѣемъ:

$$2\,E\,J = 2\,\frac{E_m}{\sqrt{2}} \times \frac{I}{\sqrt{2}} = E_m\,I$$

Когда динамо работаетъ, то воздѣйствіе арматуры отодвигаетъ поле по направленію вращенія; ось этого поля, также какъ и нейтральная линія оказываются перемѣщенными по тому же направленію, вслѣдствіе чего діаграммы (рис. 24) должны быть отодвинуты вправо на соотвѣтствующую величину.

Уравненіе (12) показываетъ, что абсолютная величина тока въ какой-либо секціи будетъ наибольшей, когда ось OZ разсматриваемой секціи совпадаетъ съ линіей полюсовъ NS. (Воздѣйствіе арматуры отодвинетъ линію NS по направленію вращенія); этотъ максимумъ тока равенъ средней эффективной каждаго изъ двухъ токовъ.

Динамо постояннаго тока мало пригодны для полученія высокихъ напряженій. Электровозбудительная сила двухфазнаго тока значительно меньше электровозбудительной силы постояннаго тока, который можетъ дать та же

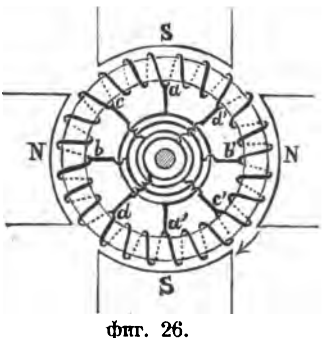
динамо; такого рода машина не можетъ производить непосредственно токовъ высокаго напряженія.

Вслѣдствіе этого возлѣ такого генератора помѣщаютъ трансформаторъ для подъема напряженія; первичная обмотка трансформатора, получающая отъ динамо два тока, состоитъ изъ двухъ совершенно отдѣльныхъ катушекъ, изъ которыхъ каждая соединена посредствомъ двухъ проволокъ съ одною парою щетокъ.

Необходимо, слѣдовательно, четыре проволоки для соединенія генератора съ трансформаторомъ. Что же касается вторичныхъ катушекъ (высокаго напряженія), то онѣ могутъ имѣть одинъ конецъ общимъ и, такимъ образомъ, линія будетъ состоять только изъ трехъ проводовъ.

Мы взяли для примѣра двухполюсную динамо; въ этомъ случаѣ число періодовъ въ секунду равно числу оборотовъ арматуры въ продолженіи того же времени; число перемѣнъ тока незначительно, что вызываетъ увеличеніе размѣровъ трансформаторовъ, а слѣдовательно увеличиваетъ и ихъ стоимость. Во избѣжаніе этого строятъ динамо съ большимъ числомъ полюсовъ: съ 4, 6, 8, 2n полюсами.

Въ динамо съ четырьмя полюсами, напримѣръ, соединяютъ съ одной парой колецъ точки *aa'* и *bb'* обмотки, расположенныя на концахъ взаимно перпендикулярныхъ діаметровъ, а другую пару колецъ съ четырьмя точками *cc'*, *dd'*, находящимися на концахъ другихъ двухъ діаметровъ, которые составляютъ съ первыми уголъ въ 45 градусовъ. Если динамо самовозбуждающаяся, то въ ней долженъ быть оставленъ ея коллекторъ и его обыкновенныя соединенія съ арматурой.



фиг. 26.

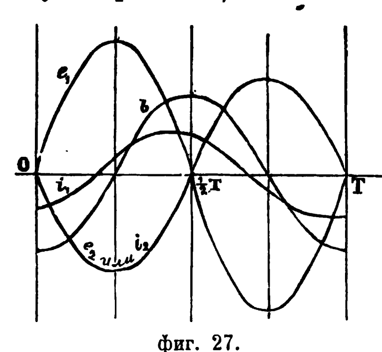
Желаніе воспользоваться для передачи электрической энергіи существующими установками освѣщенія посред-

ствомъ однофазнаго тока, а также крайняя простота смѣшанныхъ установокъ для освѣщенія и для передачи энергіи посредствомъ однофазныхъ токовъ, были причиною, заставившею искать возможности преобразовывать обыкновенные перемѣнные токи въ двухфазные.

Такое преобразованіе перемѣннаго тока въ двухфазный можетъ быть получено (Феррарисъ, Тесла) соединеніемъ одной изъ индуктирующихъ цѣпей двигателя со вторичною цѣпью трансформатора съ очень слабою нагрузкою, причемъ эта вторичная цѣпь трансформатора должна быть соединена послѣдовательно со второю индуктирующею цѣпью.

Извѣстно, въ самомъ дѣлѣ, что въ трансформаторѣ при полной нагрузкѣ, если вторичная цѣпь замкнута сопротивленіемъ безъ индукціи, то первичный токъ имѣетъ почти ту-же фазу, какъ и первичное напряженіе и находится отодвинутымъ по отношенію ко вторичному току на 180^0.

При самой незначительной нагрузкѣ вторичной цѣпи, если только магнитная цѣпь трансформатора не имѣетъ гистерезиса и въ ней не образуется токовъ Фуко, первичный токъ будетъ запаздывать, по отношенію къ первичному напряженію, на величину близкую къ $^1/_4$ періода.



фиг. 27.

На рис. 27 e_1 означаетъ напряженіе у зажимовъ первичной цѣпи, b магнитную индукцію, i_1 первичный токъ при незначительной нагрузкѣ вторичнаго; e_2 или i_2 вторичные напряженіе или токъ.

Если, такимъ образомъ, соединимъ послѣдовательно одну изъ индуктирующихъ цѣпей двигателя съ первичной цѣпью такого трансформатора, причемъ другая индуктирующая цѣпь будетъ

питаться вторичнымъ токомъ, то можно получить два тока, представляющіе разность фазъ близкую къ $^1/_4$ періода, но при условіи, чтобы работоспособность трансформатора была значительно больше его нагрузки и чтобы самоиндукціи двухъ индуктирующихъ цѣпей двигателя имѣли соотвѣтствующія величины.

Въ дѣйствительности гистерезисъ и токи Фуко, образующіеся въ сердечникѣ трансформатора, уменьшаютъ запозданіе фазы первичнаго тока относительно первичнаго напряженія. Этотъ уголъ отодвинутія имѣетъ только около 40^0 въ разомкнутой цѣпи. Кромѣ того, колебанія проницаемости сердечника и плотности магнитной индукціи измѣняютъ при слабой нагрузкѣ форму кривой первичнаго тока. Если, слѣдовательно, хотятъ получить между двумя токами разность фазъ въ 90^0, то цѣпь, соединенная послѣдовательно съ первичнымъ токомъ трансформатора, должна имѣть большую самоиндукцію, а цѣпь, питаемая вторичнымъ токомъ,—очень слабую самоиндукцію.

Употребленіе трансформатора, дѣйствующаго при слабой нагрузкѣ, увеличиваетъ значительно стоимость установки и кромѣ того на много уменьшаетъ отдачу двигателя.

Другой способъ, предложенный Тесла, состоитъ въ томъ чтобы одной изъ индуктирующихъ цѣпей дать на сколько только возможно меньшую самоиндукцію, а другой цѣпи очень большую самоиндукцію; затѣмъ, эти двѣ цѣпи соединяются параллельно съ однофазною цѣпью.

Пусть будетъ R_1, L_1 сопротивленіе и коеффиціентъ самоиндукціи первой цѣпи и $2\pi\varphi_1$ уголъ отодвинутія тока I_1 (средняя эффективная) относительно напряженія E у зажимовъ двигателя; R_2, L_2, I_2, $2\pi\varphi_2$ соотвѣтствующія количества для второй цѣпи и n число перемѣнъ тока. Имѣемъ:

$$tg\,2\pi\varphi_1 = 2\pi n\frac{L_1}{R_1}$$

$$tg\, 2\pi\varphi_2 = 2\pi n \frac{L_2}{R_2}$$

Разность фазъ между двумя токами равна:

$$2\pi\psi = 2\pi\varphi_2 - 2\pi\varphi_1$$

Возможный максимумъ $2\pi\varphi_2$ будетъ $\frac{\pi}{2}$; для того чтобы $2\pi\psi$ приблизилось къ $\frac{\pi}{2}$, необходимо имѣть:

$$2\pi\varphi_2 = \frac{\pi}{2} \text{ или } \frac{L_2}{R_2} = \infty$$

$$2\pi\varphi_1 = o \text{ или } \frac{L_1}{R_1} = 0$$

т. е., чтобы на практикѣ цѣпь (1) имѣла самый незначительный коеффиціентъ самоиндукціи и очень большое сопротивленіе. Эта цѣпь будетъ состоять, слѣдовательно, изъ небольшого числа обмотокъ значительнаго сопротивленія (Тесла предложилъ употреблять для этого мельхіоровыя проволоки).

Цѣпь (2), наоборотъ, должна имѣть очень большой коеффиціентъ самоиндукціи и весьма незначительное сопротивленіе; она будетъ состоять изъ большого числа обмотокъ толстой проволоки.

Практически уголъ $2\pi\psi$ будетъ, слѣдовательно, всегда меньше 90^0 и тѣмъ болѣе, что уголъ $2\pi\varphi_2$ долженъ быть значительно меньше $\frac{\pi}{2}$, если хотятъ, чтобы цѣпь (2) дѣйствительно усиливала работоспособность двигателя при числѣ уаттовъ у зажимовъ этой цѣпи равномъ:

$$EI_2 \cos 2\pi\varphi_2$$

Очевидно, что введеніе большого сопротивленія въ одну изъ цѣпей оказываетъ вредное вліяніе на полезное дѣйствіе первой цѣпи. Аналогичное замѣчаніе можетъ быть сдѣлано также относительно значительнаго отодвинутія то-

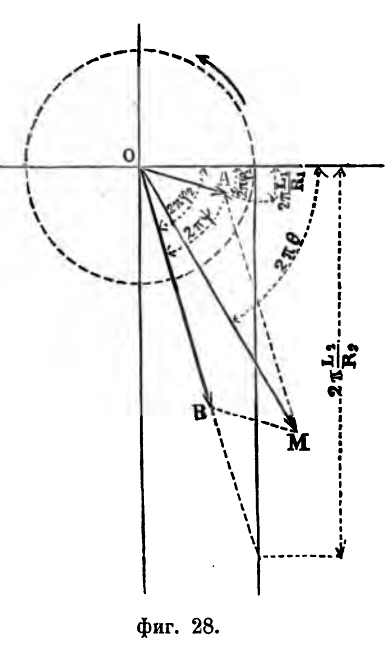
ка во второй цѣпи. Отдача такого двигателя будетъ, слѣдовательно посредственной.

Этотъ способъ полученія двухфазныхъ токовъ имѣетъ еще одно важное неудобство, а именно: усиленіе тока на линіи, вслѣдствіе значительнаго отодвинутія тока во второй цѣпи.

На діаграммѣ (рис. 28) OA означаетъ максимумъ $I_1\sqrt{2}$ тока въ первой цѣпи; $OB = I_2\sqrt{2}$ максимумъ втораго тока; OM максимумъ равнодѣйствующаго тока; уголъ запозданія этого тока относительно напряженія у зажимовъ двигателя равенъ $2\pi\Theta$ и, вслѣдствіе этого, отдача двигателя равна:

$$E \times \frac{OM}{\sqrt{2}} \cos 2\pi\Theta$$

Уголъ, представляющій разность фазъ двухъ токовъ въ двигателѣ, равенъ $2\pi\psi$.



фиг. 28.

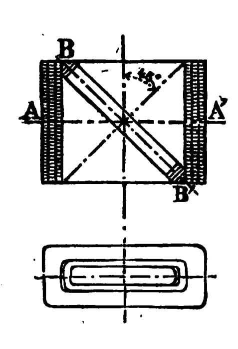
Шалленбергеръ предложилъ третій способъ полученія вращающагося магнитнаго поля съ помощью обыкновеннаго перемѣннаго тока. Для этой цѣли онъ пропускаетъ перемѣнный токъ по неподвижной катушкѣ AA′ и располагаетъ вторую неподвижную катушку BB′, меньшихъ размѣровъ и замкнутую на себя, такимъ образомъ, чтобы плоскость этой второй катушки составляла съ плоскостью первой уголъ въ 45°.

Обозначимъ чрезъ M коеффиціентъ взаимной индукціи двухъ катушекъ и чрезъ i мгновенный токъ въ первой

катушкѣ, тогда индукціонная электровозбудительная сила во второй катушкѣ будетъ:

$$e' = -M \frac{di}{dt}$$

Это уравненіе показываетъ, что индукціонная электровозбудительная сила въ BB' запаздываетъ на 1/4 періода относительно индуктирующаго тока i. Вслѣдствіе самоиндукціи токъ i' катушки BB' также запаздываетъ относительно электровозбудительной силы e' на уголъ, заключающійся между О и 90°.



фиг. 29.

Разность фазъ i и i' заключается, слѣдовательно, между 90 и 180°. Эти два тока производятъ вращающееся магнитное поле.

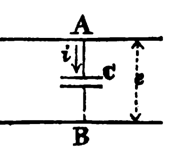
Шалленбергеръ примѣнилъ приведенный принципъ къ своему счетчику для перемѣннаго тока. Съ этою цѣлью онъ помѣщаетъ внутри двухъ катушекъ желѣзный дискъ (желѣзо служитъ для увеличенія напряженія поля), прикрѣпленный къ оси, расположенной по направленію пересѣченія среднихъ плоскостей катушекъ AA', BB'. Эта ось приходитъ во вращеніе, которое регулируется колесомъ съ лопаточками, вращающимися въ воздухѣ. Число оборотовъ диска отмѣчается на циферблатѣ.

Такого рода двигатель состоитъ, слѣдовательно, изъ неподвижной индуктирующей цѣпи, неподвижнаго индукціоннаго органа и подвижной индукціонной цѣпи.

Мы упомянули о трехъ изложенныхъ способахъ въ виду только ихъ историческаго интереса. Теперь опишемъ четвертый способъ, позволяющій раздѣлять обыкновенный перемѣнный токъ на два тока съ различными фазами, что достигается употребленіемъ конденсаторовъ, приборовъ,

служившихъ основаніемъ Гутену и Леблану въ ихъ системѣ передачи электрической энергіи посредствомъ перемѣнныхъ токовъ.

Разсмотримъ конденсаторъ, имѣющій электроемкость C и проводимость K. Этотъ конденсаторъ соединенъ непосредственно съ двумя проводниками A, B, между которыми существуетъ перемѣнное напряженіе вида:



фиг. 30.

$$(1) \qquad e = E_m \sin \frac{2\pi t}{T} = E_m \sin mt$$

Пусть будетъ i токъ въ отвѣтвленіи конденсатора въ моментъ t; будемъ имѣть очевидно:

$$(2) \qquad idt = K\,edt + C\,de$$

или:

$$(3) \qquad i = ke + C\frac{de}{dt} = K\,E_m \sin mt + C\,E_m\, m \cos mt$$

Положимъ:

$$(4) \qquad \frac{C\,m}{K} = tg\, m\varphi$$

Будемъ имѣть:

$$(5) \qquad i = E_m \sqrt{K^2 + C^2 m^2} \sin(mt + m\varphi)$$

Пусть будетъ E эффективное напряженіе, равное $\frac{E_m}{\sqrt{2}}$

Средняя мощность, теряемая въ конденсаторѣ будетъ:

$$w = KE^2$$

Потеря въ уаттахъ для даннаго конденсатора пропорціональна, слѣдовательно, его проводимости съ одной стороны и квадрату напряженія у его зажимовъ—съ другой стороны. Необходимо, очевидно, довести количество KE^2 до минимума и это не только во избѣжаніе потери энергіи, но еще и потому, что эта энергія, проявляясь въ ви-

дѣ теплоты, можетъ разрушить конденсаторъ. Если напряженіе дано, то единственнымъ множителемъ, на который можно дѣйствовать, остается проводимость конденсатора. Нужно, слѣдовательно, чтобы проводимость употребляемаго въ такихъ случаяхъ конденсатора была практически равна нулю.

Въ виду этого мы допустимъ въ слѣдующихъ разсужденіяхъ, что

$$(6) \qquad K = 0$$

Тогда изъ уравненія (4) получимъ:

$$m\varphi = \frac{\pi}{2}$$

и (5) обратится въ:

$$(7) \qquad i = CmE\sqrt{2}\sin\left(mt + \frac{\pi}{2}\right) = CmE\sqrt{2}\cos mt$$

Фаза тока i находится, слѣдовательно, впереди на $^1/_4$ періода относительно напряженія e у зажимовъ конденсатора.

Средняя эффективная тока въ отвѣтвленіи конденсатора будетъ:

$$(8) \qquad I = CmE = C \times 2\pi n E = \frac{E}{\left(\frac{1}{C \times 2\pi n}\right)}$$

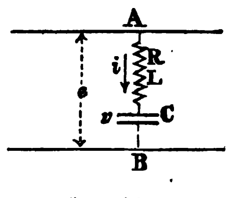
n обозначаетъ число перемѣнъ тока.

Слѣдовательно, *что касается силы тока въ отвѣтвленіи*, то конденсаторъ равносиленъ цѣпи, проводимость которой равна $C \times 2\pi n$ или сопротивленіе которой равно $\frac{1}{C \times 2\pi n}$.

Если C выражено въ фарадахъ и E въ вольтахъ, то I будетъ означать амперы.

Разсмотримъ теперь цѣпь, имѣющую сопротивленіе R и коеффиціентъ самоиндукціи L. Предположимъ, что эта

цѣпь соединена послѣдовательно съ конденсаторомъ емкости C, установленнымъ между проводниками A и B, у зажимовъ которыхъ существуетъ перемѣнное напряженіе e, средняя эффективная котораго равна E. Пусть будетъ v напряженіе въ моментъ времени t между арматурами конденсатора, i токъ въ цѣпи AC и n число перемѣнъ тока въ проводникахъ A, B.



фиг. 31.

Возьмемъ за начало времени моментъ, когда токъ i равенъ нулю; назовемъ чрезъ I среднюю эффективную этого тока, будемъ имѣть:

$$e = Ri + L\frac{di}{dt} + v \tag{1}$$

$$dv = \frac{idt}{C} \tag{2}$$

Откуда:

$$v = \frac{1}{C}\int idt \tag{3}$$

Или, положивъ:

$$i = (I\sqrt{2}) \sin mt \tag{4}$$

$$v = -\frac{I\sqrt{2}}{mC} \cos mt$$

Вслѣдствіе чего уравненіе (1) обратится въ:

$$e = R(I\sqrt{2}) \sin mt + \left(mL - \frac{1}{mC}\right) I\sqrt{2} \cos mt \tag{5}$$

Если положимъ:

$$\frac{mL - \frac{1}{mC}}{R} = tg\, m\varphi \tag{6}$$

то будемъ имѣть:

$$(7)\quad e = (I\sqrt{2})\sqrt{\left(mL - \frac{1}{mC}\right)^2 + R^2}\,\sin(mt + m\varphi)$$

и

$$(8)\qquad E = I\sqrt{\left(mL - \frac{1}{mC}\right)^2 + R^2}$$

$$= \frac{I}{mC}\sqrt{(m^2\,CL - 1)^2 + m^2\,C^2\,R^2}$$

Уголъ $m\varphi$ представляетъ разность фазъ напряженія e и тока i. Эффективная сила этого тока равна:

$$(9)\qquad I = \frac{E}{\sqrt{\left(mL - \frac{1}{mC}\right)^2 + R^2}}$$

Если V средняя эффективная v, то будемъ имѣть:

$$(10)\qquad V = \frac{I}{mC}$$

Уравненіе (8) обратится въ:

$$(11)\qquad E = V\sqrt{(m^2\,CL - 1)^2 + m^2\,C^2\,R^2}$$

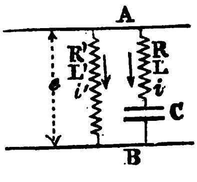
Вслѣдствіе чего эффективное напряженіе конденсатора будетъ:

$$(12)\qquad V = \frac{E}{\sqrt{(m^2\,CL - 1)^2 + m^2\,C^2\,R^2}}$$

Уравненія (4) и (7) показываютъ, что фаза тока i въ отвѣтвленіи конденсатора запаздываетъ или находится впереди относительно напряженія e, смотря по тому, будетъ ли выраженіе $\dfrac{mL - \frac{1}{mC}}{R}$ положительнымъ или отрицательнымъ.

Абсолютная величина возможнаго максимума этого угла равна $\frac{\pi}{2}$.

Если мы установимъ между проволоками A, B вторую цѣпь, сопротивленіе которой R' и коеффиціентъ самоиндукціи L', и эта цѣпь будетъ представлять собою вторую индуктирующую обмотку двигателя, то фаза тока i' въ этомъ проводникѣ будетъ запаздывать относительно фазы e на уголъ $m\varphi'$, опредѣляемый уравненіемъ:



фиг. 32.

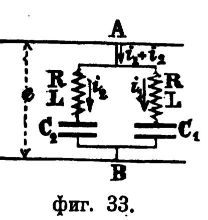
$$tg\ m\varphi' = \frac{mL'}{R'}$$

и уголъ отодвинутія двухъ токовъ i и i' будетъ:

$$m\varphi + m\varphi'.$$

Такъ какъ углы $m\varphi$ и $m\varphi'$ могутъ измѣняться каждый отъ 0 до $\frac{\pi}{2}$, то, выбравъ надлежащія величины для коеффиціентовъ R, L, C, R', L', можно сдѣлать сумму этихъ угловъ равной $\frac{\pi}{2}$.

Можно также взять двѣ совершенно одинаковыя цѣпи и ввести въ нихъ два конденсатора, емкости которыхъ C_1 и C_2, вычислены такимъ образомъ, что фаза одного изъ токовъ i_1 находится впереди на $\frac{\pi}{4}$, а фаза другого тока i_2 запаздываетъ на $\frac{\pi}{4}$ относительно напряженія e.



фиг. 33.

Отодвинутія e относительно i_1 и i_2 опредѣлятся, слѣдовательно, отношеніями:

$$(13) \qquad \frac{mL - \frac{1}{mC_1}}{R} = -1$$

$$(14) \qquad \frac{mL - \frac{1}{mC_2}}{R} = 1$$

Откуда получаемъ:

$$(15) \qquad C_1 = \frac{1}{m(mL + R)}$$

$$(16) \qquad C_2 = \frac{1}{m(mL - R)}$$

Такъ какъ C_2 должно быть положительнымъ, то

$$mL > R.$$

Уравненіе (9) совмѣстно съ уравненіями (13) и (14) показываетъ, что эффективная сила тока въ двухъ цѣпяхъ одинакова и равна:

$$(17) \qquad I = \frac{E}{R\sqrt{2}}$$

Будемъ теперь считать начало времени съ момента, когда $e = 0$. Токи i_1 и i_2 выразятся равенствами:

$$(18) \qquad \begin{cases} i_1 = \frac{E}{R} \sin\left(mt + \frac{\pi}{4}\right) \\ i_2 = \frac{E}{R} \sin\left(mt - \frac{\pi}{4}\right) \end{cases}$$

Мощность каждаго тока будетъ:

$$(19) \qquad \frac{W}{2} = E \times \frac{E}{R\sqrt{2}} \times \cos\frac{\pi}{4} = \frac{E^2}{2R} = EI\frac{\sqrt{2}}{2}$$

Весь токъ въ отвѣтвленіи будетъ:

$$(20) \qquad i_1 + i_2 = \frac{E}{R}\sqrt{2} \sin mt$$

Его фаза совпадаетъ съ фазою напряженія e, средняя эффективная тока равна:

$$(21) \qquad J = \frac{E}{R} = I\sqrt{2}$$

Вся мощность, доставляемая къ зажимамъ двигателя, будетъ:

$$W = \frac{E^2}{R} = EJ \qquad (22)$$

это уравненіе даетъ также сопротивленіе каждой индуктирующей цѣпи.

Такъ какъ весь токъ въ отвѣтвленіи АВ не имѣетъ отодвинутія относительно напряженія, то токъ линіи будетъ тотъ же самый, какъ и въ двигателѣ съ постояннымъ токомъ, что составляетъ преимущество приведеннаго способа, важное при канализаціи.

При этомъ способѣ два отдѣльные тока въ индуктирующихъ обмоткахъ будутъ больше постоянныхъ токовъ того же напряженія и той же мощности въ отношеніи $\sqrt{2} : 1$.

Пусть будетъ, напримѣръ, двухфазный двигатель, питаемый однофазнымъ токомъ въ 100 вольтовъ и требующій 10 килоуаттовъ при полной нагрузкѣ. Токъ въ отвѣтвленіи, идущемъ къ двигателю, будетъ имѣть 100 амперовъ и токъ въ каждой изъ обмотокъ около 70 амперовъ.

Возвратимся къ уравненіямъ (13) и (14). R опредѣляется изъ уравненія (22); L есть функція нагрузки двигателя; оно уменьшается по мѣрѣ того, какъ работоспособность двигателя увеличивается.

Вычисляютъ C_1 и C_2 для величины L, соотвѣтствующей, напримѣръ, полной нагрузкѣ, тогда разность фазъ токовъ i_1 и i_2 будетъ измѣняться вмѣстѣ съ нагрузкою двигателя.



ТРЕТЬЯ ЧАСТЬ.

Теорія и вычисленіе двигателей съ вращающимся полемъ.

ГЛАВА V.

Двигатели синхроничные и азинхроничные *).

Мы указали въ первой части этого сочиненія на раздѣленіе многофазныхъ двигателей на двѣ категоріи:

1. Многофазные двигатели синхроничные;
2. Многофазные двигатели азинхроничные.

Синхроничные двигатели съ вращающимся полемъ.

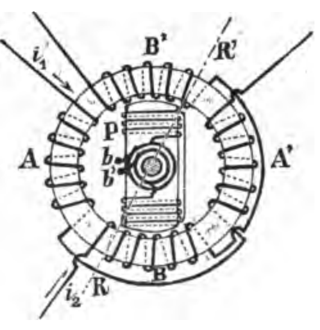
Угловая скорость этихъ двигателей не зависитъ отъ степени ихъ нагрузки; она находится въ зависимости исключительно отъ числа перемѣнъ токовъ, питающихъ двигатели.

Въ такого рода двигателяхъ часть магнитной цѣпи, по которой не проходитъ многофазный токъ, устроена такимъ образомъ, что при ея угловомъ запозданіи относительно вращающагося поля, превышающемъ извѣстный предѣлъ, вращающая пара становится значительно больше своей нормальной величины и, вслѣдствіе этого, стремится при-

---

*) Т. е. несинхроничные.

вести двигатель къ синхронизму. Приспособленіе обыкновенно употребляемое для этой цѣли состоитъ въ томъ, что означенную часть магнитной цѣпи снабжаютъ выступами или полюсами, снабженными обмоткой, замкнутой на себя или же питаемой постояннымъ токомъ такимъ образомъ, чтобы въ каждомъ выступѣ этой части цѣпи при нормальномъ ходѣ двигателя была постоянная полярность. На фиг. 34 представлена схема двухфазнаго синхроничнаго двигателя Тесла. Индукторъ этого двигателя состоитъ изъ кольца съ 4 обмотками, занимающими каждая одну четверть окружности. Обмотки A, A′ на концахъ одного изъ діаметровъ соединены между собою послѣдовательно и по нимъ проходитъ токъ $i_1 = J \sin mt$; обмотки B, B′ также соединены послѣдовательно и по нимъ проходитъ токъ $i_2 = - J \cos mt$. Такимъ образомъ получаютъ магнитное поле, направленное по діаметру и вращающееся въ сторону обратную движенію часовыхъ стрѣлокъ.



фиг. 34.

Внутри этого кольца помѣщенъ электромагнитъ, концы обмотки котораго упираются въ два металлическія изолированныя кольца, соприкасающіяся съ двумя щетками bb'. При пусканіи въ ходъ двигателя, обмотка электромагнита замыкается сама на себя или же посредствомъ введенія въ нее надлежащаго сопротивленія, соединеннаго со щетками bb'.

Разсмотримъ электромагнитъ въ положеніи, указанномъ на рисункѣ. Его обмотка замкнута однимъ изъ способовъ, означенныхъ выше. При $t = o$, обмотка индуктора стремится образовать сѣверный полюсъ въ A′ и южный въ A. Такъ какъ поле вращается по направленію A′B′AB, то линіи силъ пронизываютъ сердечникъ P по направленію

В'В; вслѣдствіе этого, въ обмоткѣ Р появляется токъ, который стремится уменьшить силу поля и отодвинуть послѣднее назадъ. Изъ этого слѣдуетъ, что время, въ продолженіи котораго полюсъ приближается къ электромагниту, т. е. когда кольцо притягиваетъ къ себѣ этотъ послѣдній, будетъ меньше времени, въ продолженіи котораго полюсъ удаляется отъ магнита, притягивая его къ себѣ. Кромѣ того, когда полюсъ приближается къ арматурѣ, воздѣйствіе обмотки этой послѣдней стремится разсѣять въ воздухѣ линіи силъ, порождаемыя индукторомъ, что также ослабляетъ пару, дѣйствующую на арматуру по направленію обратному движенію полюсовъ индуктора, т. е. движенію самой арматуры. Наоборотъ, когда полюсы кольца индуктора удаляются отъ электромагнита, то воздѣйствіе обмотки этого послѣдняго препятствуетъ уменьшенію силы магнитнаго поля, что усиливаетъ двигающую пару; слѣдовательно, двигатель будетъ стремиться придти въ движеніе автоматически.

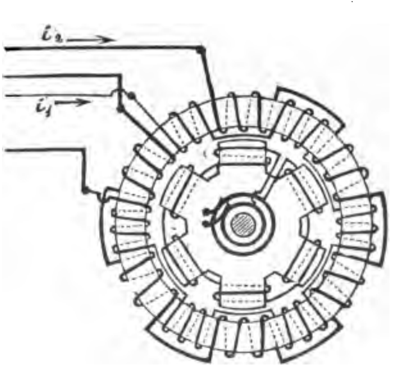
Если пара сопротивленія не слишкомъ значительна, то движеніе двигателя будетъ ускоряться и достигнетъ скорости движенія полюсовъ индуктора; эти послѣдніе будутъ впереди полюсовъ арматуры на величину, находящуюся въ зависимости отъ величины пары сопротивленія. Разъ синхронизмъ достигнутъ, то, въ случаѣ увеличенія по какой либо причинѣ запозданія арматуры относительно индуктирующаго поля, обмотка арматуры будетъ стремиться увеличить силу поля, а слѣдовательно и двигающую пару. Если пара сопротивленія увеличится на постоянную величину, то и полюсы индуктора опередятъ полюсы арматуры настолько, чтобы наклоненіе линій силъ въ междужелѣзномъ пространствѣ соотвѣтствовало потребной двигающей парѣ.

Означимъ чрезъ n число перемѣнъ тока или число періодовъ въ секунду каждаго изъ двухъ токовъ. Слѣдовательно, двигатель, устроенный согласно схемѣ (фиг. 34), будетъ дѣлать n оборотовъ въ секунду. Если, напримѣръ,

$n = 50$, то двигатель будетъ дѣлать $50 \times 60 = 3000$ оборотовъ въ минуту. Эта скорость черезчуръ велика, если только не употреблять двигателей съ очень незначительною работоспособносью.

Удобнѣе строить двигатель, могущій дѣлать $\frac{n}{K}$ оборотовъ въ секунду. Для достиженія этого снабдимъ кольцеобразный индукторъ 4 K обмотокъ, 1, 2, 3, 4, 5... (4 K—1), 4 K, занимающихъ каждая $\left(\frac{1}{4\,K}\right)$ окружности; обмотки нечетнаго порядка 1, 3, 5... (4 K — 1) составятъ одинъ рядъ, питаемый однимъ изъ токовъ $i_1 = J \sin mt$; обмотки четнаго порядка 2, 4... 4 K составятъ другой рядъ, питаемый токомъ $i_2 = - J \cos mt$. Обмотки каждаго ряда сдѣланы попеременно то въ одну, то въ другую сторону и соединены между собою послѣдовательно, какъ это указано на фиг. 35, т. е. конецъ одной обмотки соединенъ съ началомъ другой того же ряда. Обмотки кольца произведутъ въ сердечникѣ 2 K полюсовъ попеременно сѣверныхъ и южныхъ. Арматура снабжена 2 K полярными выступами, имѣющими обмотки, расположенныя также, какъ и на индукторѣ.

Легко видѣть, что въ промежутокъ одного періода каждый индуктирующій полюсъ перемѣстится на величину, соотвѣтствующую четыремъ обмоткамъ, т. е. на $\left(\frac{1}{K}\right)$ окружности; то же самое будетъ и относительно арматуры при ея нормальномъ движеніи, такъ какъ она вращается синхронично съ полями, производимыми многофазнымъ токомъ; подвижная часть двигателя будетъ дѣлать,

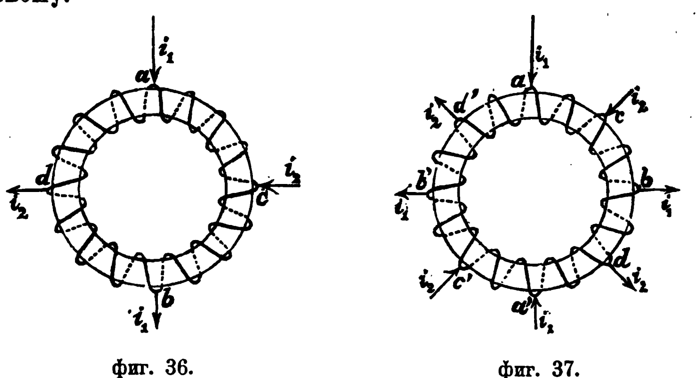


фиг. 35.

слѣдовательно, $\frac{n}{K}$ оборотовъ въ секунду. На фиг. 35 изображена схема двигателя съ 6 вращающимися полюсами; при $n = 50$ этотъ двигатель будетъ дѣлать, слѣдовательно, $\frac{50}{3} \times 60 = 1000$ оборотовъ въ минуту.

Такимъ образомъ, двигатель подобнаго рода, дѣйствующій посредствомъ тока, число перемѣнъ котораго n, можетъ имѣть угловою скоростью (число оборотовъ въ секунду) только величины n, $\frac{n}{2}$, $\frac{n}{3}$...., выражающія частное отъ дѣленія числа перемѣнъ тока на какое нибудь цѣлое число.

Двигатель Газельвандера снабженъ непрерывною обмоткою, какъ на кольцѣ Грамма, по которой проходитъ многофазный токъ. Въ случаѣ тока двухфазнаго одинъ изъ токовъ i_1 вступаетъ въ обмотку съ двухъ точекъ a, b на концахъ одного діаметра, а токъ i_2 съ двухъ точекъ c, d на концахъ другого діаметра, перпендикулярнаго къ первому.

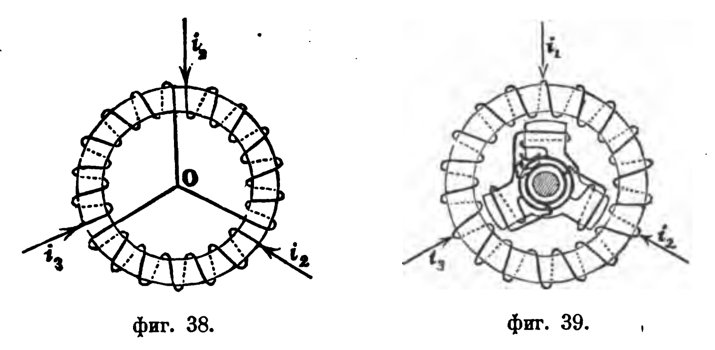


фиг. 36. фиг. 37.

Мы видѣли еще раньше, что такая установка для провода двухфазнаго тока требуетъ 4 проволокъ, тогда какъ въ предшествующемъ примѣрѣ число проволокъ можетъ быть доведено до трехъ.

Для того, чтобы уменьшить угловую скорость двигателя, можно еще болѣе увеличить число полюсовъ, порождаемыхъ въ кольцѣ. Если, напримѣръ, хотятъ, чтобы двигатель дѣлалъ $\frac{n}{2}$ оборотовъ въ секунду, то соединяютъ одну изъ проволокъ, проводящихъ токъ i_1, съ двумя точками aa' кольца, находящимися на разстояніи полуокружности другъ отъ друга, а вторую проволоку i_1 съ двумя точками bb', расположенными на концахъ діаметра, перпендикулярнаго къ aa'; каждая проволока, проводящая токъ i_2, соединяется соотвѣтственно съ точками cc', dd', находящимися попарно на разстояніи $^1/_8$ окружности отъ первыхъ четырехъ точекъ aa' bb'. Такимъ образомъ, получается четыре полюса, которые пробѣгаютъ полуокружность въ промежутокъ одного періода.

На фиг. 38 и 39 изображены схемы двигателей, аналогичныхъ описаннымъ, но устроенныхъ для трехфазныхъ токовъ. Арматура можетъ имѣть два полюса, но предпочтительнѣе, чтобы ихъ было три.



фиг. 38. фиг. 39.

Если три тока представляютъ попарно разность фазъ въ $^1/_3$ періода, то концы трехъ обмотокъ (фиг. 38) могутъ быть соединены вмѣстѣ и тогда получится соединеніе звѣздочкой. Въ случаѣ же, указанномъ на фиг. 39, достаточно соединить три проволоки линіи съ тремя точками обмотки, отстоящими другъ отъ друга на $^1/_3$ окружности; это бу-

детъ соединенiе треугольникомъ или закрытое соединенiе.

Уменьшенiе угловой скорости въ случаѣ трехфазнаго тока достигается тѣмъ же путемъ, который былъ указанъ нами для двухфазныхъ двигателей, т. е. увеличенiемъ числа полюсовъ кольца.

Мы упомянемъ здѣсь о двухфазномъ двигателѣ Шуккерта, уже испытанномъ въ промышленныхъ примѣненiяхъ электричества. Этотъ двигатель соотвѣтствуетъ схемамъ фиг. 23 и 26; его арматура неподвижна и находится внѣ кольца, получающаго двухфазный токъ. Такого рода двигатель есть ничто иное, какъ обыкновенная динамо Шукерта съ плоскимъ кольцомъ, вращающимся между рядомъ паръ электромагнитовъ, расположенныхъ на двухъ вѣнцахъ съ одной и съ другой стороны кольца; полюсы, находящiеся другъ противъ друга, одноименны; эти пары полюсовъ поперемѣнно сѣверные и южные. Ось динамо продолжена и снабжена четырьмя металлическими кольцами, изолированными другъ отъ друга и соединенными каждое съ однимъ рядомъ точекъ обмотки кольца машины, равноотстоящихъ одна отъ другой, какъ это было указано нами выше (см. также фиг. 26).

Съ каждымъ изъ этихъ колецъ соприкасается щетка, соединенная съ одной изъ проволокъ, проводящихъ токъ. Эти проволоки идутъ непосредственно отъ подобнаго же генератора или, что чаще, они соединяются съ четырьмя концами двухъ вторичныхъ независимыхъ обмотокъ трансформатора, какъ это было уже объяснено нами во второй части этого труда.

Мы также указали, что увеличенiе числа индуктирующихъ полюсовъ генератора имѣетъ отчасти цѣлью привести число перемѣнъ тока къ величинѣ удобной для установки трансформаторовъ.

Въ двигателяхъ слабой и средней работоспособности концы обмотокъ электромагнитовъ упираются въ двѣ щетки обыкновеннаго коллектора динамо; въ двигателяхъ же

значительной работоспособности возбужденіе производится посредствомъ отдѣльной машины постояннаго тока.

Для того, чтобы пустить въ ходъ подобный двигатель, прерываютъ цѣпь возбужденія и пропускаютъ въ кольцо двухфазный токъ. Въ кольцѣ образуется рядъ полюсовъ (въ числѣ равномъ числу паръ электромагнитовъ), вращающихся въ пространствѣ съ постоянною скоростью. Если кольцо неподвижно, а магниты подвижны, то эти послѣдніе, увлекаемые движеніемъ полюсовъ, будутъ вращаться вокругъ оси машины въ ту же сторону, какъ и полюсы, стремясь достигнуть одинаковой съ ними скорости. Такъ какъ въ разсматриваемомъ двигателѣ арматура изъ мягкаго желѣза неподвижна, то въ этомъ случаѣ придетъ въ движеніе кольцо въ сторону обратную движенію образующихся въ немъ полюсовъ, которые, въ свою очередь, будутъ стремиться занять положеніе противъ полярныхъ частей арматуры; при этомъ линіи силъ, образуемыя кольцомъ, будутъ замыкаться цѣпью со слабымъ сопротивленіемъ, которое представляетъ собою желѣзо электромагнитовъ.

Двигатель можетъ быть пущенъ въ ходъ будучи уже нагруженнымъ; его движеніе не должно быть обязательно синхроничнымъ, но оно всегда стремится достигнуть синхронизма.

Такъ какъ вращеніе кольца происходитъ вслѣдствіе притяженія образующихся въ немъ полюсовъ къ желѣзу электромагнитовъ, то легко понять, что при одинаковыхъ размѣрахъ работоспособность двигателя можетъ быть увеличена въ значительной пропорціи, если только намагнитить желѣзо электромагнитовъ; при этомъ магнитныя поля между полюсами магнитовъ и кольцомъ пріобрѣтутъ большую напряженность, а слѣдовательно притяженіе органовъ неподвижнаго и подвижнаго также увеличится. Что касается тока, питающаго двигатель, то такое увеличеніе работоспособности послѣдняго вызываетъ, очевидно, *увеличеніе напряженія двухфазнаго тока.*

Въ двигателяхъ, работающихъ обыкновеннымъ перемѣннымъ токомъ намагничиванiе электромагнитовъ производится частью перемѣннаго тока, которая по выпрямленiи ея проходитъ по обмоткамъ электромагнитовъ; изъ этого слѣдуетъ, что магнетизмъ сердечниковъ постоянно измѣняется, вслѣдствiе чего они должны быть составлены изъ листового желѣза или изъ проволокъ, но не изъ цѣльнаго желѣза; кромѣ того, гистерезисъ и токи Фуко вызываютъ нѣкоторую потерю въ работоспособности двигателя.

Если, наоборотъ, намагничиванiе электромагнитовъ производится постояннымъ токомъ, какъ въ двигателѣ Шукерта, то сердечники обходятся дешевле, такъ какъ они могутъ быть сдѣланы изъ прокованнаго желѣза или изъ чугуна; кромѣ того, въ этомъ случаѣ токъ для возбужденiя можетъ быть менѣе сильнымъ, такъ какъ онъ необходимъ только для поддержанiя магнетизма сердечниковъ.

Въ двигателѣ Шукерта возбужденiе электромагнитовъ должно производиться только тогда, когда двигатель уже достигъ синхроничнаго хода. Въ самомъ дѣлѣ, если возбудить электромагниты раньше этого, то двигатель остановится, такъ какъ притяженiе электромагнитовъ не будетъ всегда дѣйствовать по одному и тому же направленiю; но стоитъ только прервать цѣпь возбужденiя и двигатель тотчасъ же придетъ въ движенiе.

Очень полезно, если не необходимо, предоставить машинисту, которому порученъ надзоръ за двигателемъ, возможность непосредственно распознавать тотъ моментъ, когда двигатель вращается синхронично. Это достигается посредствомъ обыкновеннаго вольтометра безъ постояннаго магнита, какъ напримѣръ вольтометръ Гуммеля, который соединяютъ съ концами обмотокъ электромагнитовъ. Разъ только двигатель не вращается синхронично, то линiи силъ, производимыя кольцомъ, замыкаются то въ воздухѣ, то въ желѣзныхъ сердечникахъ; вслѣдствiе этого число линiй силъ, пронизывающихъ эти сердечники, постоянно измѣняется, что порождаетъ въ ихъ обмоткахъ перемѣн-

ную электро-возбудительную силу, указываемую вольтометромъ. Какъ только двигатель достигнетъ синхронизма, полюсы кольца будутъ постоянно противъ полюсовъ магнитовъ и число линій силъ, пронизывающихъ сердечники, не будетъ замѣтно измѣняться. Такимъ образомъ, вольтометръ при пусканіи двигателя въ ходъ покажетъ сильное отклоненіе стрѣлки, которое постепенно будетъ уменьшаться и наконецъ обратится въ нуль, когда двигатель достигнетъ синхронизма; если въ тотъ моментъ возбудить электромагниты, то вольтометръ укажетъ напряженіе тока возбудителя.

Когда электромагниты возбуждаются постояннымъ токомъ, то работоспособность двигателя увеличивается въ 4—5 разъ сравнительно съ той, которую онъ проявляетъ безъ возбужденія.

Что же касается вычисленія подобнаго рода двигателя, то мы отсылаемъ читателя къ предшествующей главѣ, въ которой разсмотрѣнъ генераторъ однороднаго съ нимъ типа.

На Франкфуртской выставкѣ 1891 г. находился самовозбуждающійся двигатель Шукерта въ 25 лошадиныхъ силъ, съ 4 парами электромагнитовъ, снабженный обыкновеннымъ коллекторомъ и четырьмя кольцами. Другой двигатель въ 50 лошадиныхъ силъ, съ 6 парами электромагнитовъ имѣлъ также только 4 кольца; его возбужденіе производилось особой маленькой динамо постояннаго тока. Этотъ двигатель приводилъ въ дѣйствіе центробѣжную помпу, доставлявшую воду для искусственнаго водопада.

Если подобный двигатель снабженъ обыкновеннымъ коллекторомъ динамо постояннаго тока, то его приложенія могутъ быть весьма разнообразны.

Такъ онъ можетъ служить:

1. Какъ динамо обыкновеннаго постояннаго тока;

2. Какъ самовозбуждающаяся динамо перемѣннаго тока, дающая одинъ или два перемѣнные тока;

3. Какъ двигатель постояннаго тока;

4. Какъ двухфазный двигатель;

5. Какъ трансформаторъ двухфазнаго тока въ постоянный;

6. Какъ трансформаторъ постояннаго тока въ двухфазный.

Наконецъ, онъ можетъ выполнять одновременно нѣсколько изъ этихъ функцій; такъ, напримѣръ, дѣйствуя какъ трансформаторъ, онъ можетъ въ то же время производить механическую работу.

Динамо трехфазнаго тока Броуна, которую мы описали на стр. 49, можетъ также служить синхроничнымъ трехфазнымъ двигателемъ.

Этотъ двигатель приходитъ въ движеніе самостоятельно, разъ только прервать цѣпь возбужденія или замкнуть ее на себя или же замкнуть сопротивленіемъ, которое можно регулировать. Возбужденіе машины должно быть произведено только тогда, когда достигнутъ синхронизмъ.

Двигатели азинхроничные съ вращающимся полемъ.

Эти двигатели, какъ и обыкновенные, состоятъ изъ одной неподвижной части и другой подвижной; одна изъ этихъ частей составляетъ индукторъ, снабженный системой обмотокъ, по которымъ проходитъ многофазный токъ; другая часть составляетъ арматуру, замыкающую магнитныя цѣпи индуктора; арматура также снабжена рядомъ обмотокъ, составляющихъ одну или нѣсколько цѣпей, замкнутыхъ на себя; эти цѣпи могутъ быть отдѣлены другъ отъ друга или соединены вмѣстѣ.

Обмотки индуктора производятъ систему измѣняющихся магнитныхъ полей. Пусть будетъ A какая нибудь точка полярной поверхности этого индуктора и β плотность магнитной индукціи въ междужелѣзномъ пространствѣ въ точкѣ A и въ моментъ t. Поле въ этой точкѣ будетъ имѣть ту же величину β въ промежутки времени, равные

періодическому времени T каждаго тока, составляющаго многофазный токъ. Пусть будетъ B точка арматуры, находящаяся противъ A въ моментъ t. Если при нормальномъ движеніи двигателя скорость его вращенія будетъ такова, что B проходитъ мимо A (или обратно, если арматура неподвижна, а индукторъ подвиженъ) въ промежутки времени, равные періодическому времени T или числу кратному T (смотря по конструкціи двигателя), то говорятъ, что двигатель *синхроничный* или что онъ вращается *синхронично съ генераторомъ*, въ противномъ случаѣ двигатель будетъ *азинхроничнымъ*.

Въ многофазныхъ азинхроничныхъ двигателяхъ магнитныя поля, производимыя индукторомъ, порождаютъ въ системѣ замкнутыхъ обмотокъ арматуры токи, которые своимъ воздѣйствіемъ на магнитныя поля производятъ вращающую пару, которая и приводитъ въ движеніе подвижную часть машины.

Пара эта получается только тогда, когда напримѣръ арматура, при подвижности этой послѣдней, вращается съ меньшей скоростью чѣмъ та, которая соотвѣтствуетъ синхронизму. Такимъ образомъ, чтобы получить вращающую пару въ приведенномъ нами примѣрѣ необходимо, чтобы точка B, находящаяся противъ A въ моментъ t, не достигала еще A въ промежутокъ времени, равный періоду (или величинѣ кратной періоду, смотря по конструкціи двигателя). Это запозданіе B относительно A постоянно увеличивается, вслѣдствіе чего въ то-же время усиливается вращающая пара. Запозданіе будетъ равно нулю, когда двигатель вращается синхронично съ генераторомъ.

Слѣдовательно, подобнаго рода двигатель можетъ достигнуть приблизительно синхронизма только тогда, когда онъ совершенно не нагруженъ; по мѣрѣ того, какъ пара сопротивленія увеличивается, скорость двигателя уменьшается.

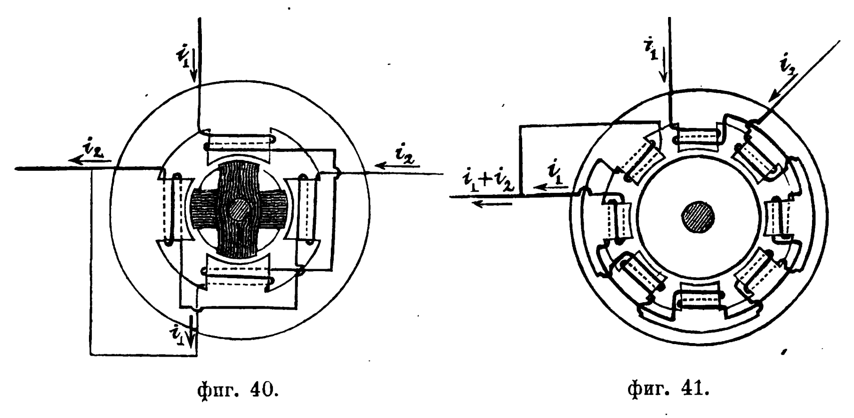
Въ синхроничныхъ двигателяхъ, какъ это мы указали раньше, сердечникъ арматуры имѣетъ выступы; тогда какъ въ азинхроничныхъ двигателяхъ этотъ сердечникъ напоми-

наетъ своею формою тѣло вращенія, вслѣдствіе чего сопротивленіе различныхъ магнитныхъ цѣпей остается почти постояннымъ при всякомъ положеніи арматуры относительно индуктора.

Въ первой части этого труда (рис. 8) мы уже изложили принципъ двигателя подобнаго типа самой простѣйшей конструкціи.

Въ небольшомъ двигателѣ Феррариса двѣ неподвижныя обмотки расположены подъ прямымъ угломъ и получаютъ два тока, отодвинутые на $^1/_4$ періода. Внутри этихъ обмотокъ помѣщенъ пустой мѣдный цилиндръ, закрытый со своихъ концовъ и вращающійся вокругъ двухъ стержней, составляющихъ продолженіе оси цилиндра.

Индукторъ азинхроничнаго двигателя Тесла съ вращающимся полемъ (рис. 40) представляетъ собою кольцо изъ листового желѣза, внутри котораго сдѣланы полюсные выступы, между которыми вращается цилиндрическая ар-



фиг. 40.　　　　фиг. 41.

матура также изъ листоваго желѣза, снабженная двумя обмотками, расположенными по двумъ взаимно перпендикулярнымъ меридіональнымъ плоскостямъ.

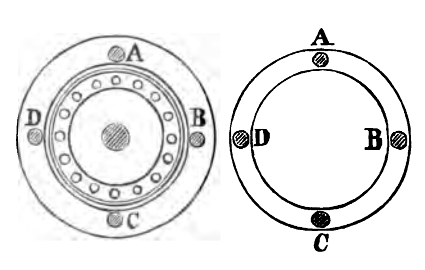
Для возбужденія индуктора выступы послѣдняго имѣютъ также обмотки. Обмотки нечетнаго порядка соединены послѣдовательно и получаютъ одинъ изъ токовъ i_1;

полюсы этого ряда въ какой-нибудь данный моментъ попеременно северные и южные; обмотки четнаго порядка также соединены между собою последовательно, по нимъ проходитъ токъ i_2 и полюсы этого ряда также разноименны.

Увеличивъ число полюсовъ индуктора, какъ это сделалъ Тесла, можно уменьшить угловую скорость двигателя. На рис. 41 изображенъ двигатель съ 8 полюсами. Полюсы нечетнаго порядка попеременно северные и южные, ихъ обмотки соединены последовательно и питаются однимъ изъ токовъ i_1; полюсы четнаго порядка также разноименны и по ихъ обмоткамъ проходитъ второй токъ i_2. Обмотки арматуры замкнуты на себя; дуга, которую занимаетъ каждая изъ нихъ, соответствуетъ углу трехъ полюсовъ; такъ, напримеръ, обмотка, одна изъ сторонъ которой параллельна оси, находящейся напротивъ полюса ряда K, будетъ иметь другую свою сторону по образующей, находящейся напротивъ полюса ряда K + 2.

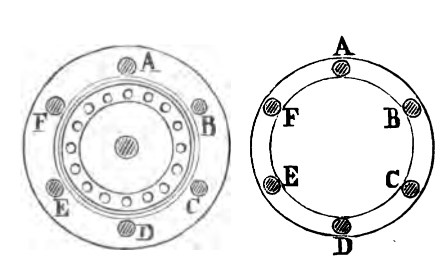
Двигатель Газельвандера двухфазный или трехфазный, изображенный на рис. 38 и 39, можетъ быть превращенъ въ азинхроничный, если только снабдить его арматурой съ замкнутыми обмотками, какъ показано на рис. 40. Эти обмотки представятъ для линiй силъ, образуемыхъ индукторомъ, цепь съ почти постояннымъ сопротивленiемъ при всехъ положенiяхъ арматуры.

На рис. 42 изображена схема двухфазнаго двигателя съ однимъ вращающимся полемъ, построеннаго Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft въ Берлине. Индукторъ этого двигателя сделанъ изъ листоваго тонкаго железа и представляетъ собою кольцеобразный сердечникъ, въ которомъ просверлено четыре отверстiя на концахъ двухъ



Фиг. 42.

взаимно перпендикулярныхъ діаметровъ, очень близко отъ внутренней поверхности сердечника. Въ эти отверстія вставляются четыре мѣдныя полосы A, B, C, D, припаянныя одними своими концами къ мѣдному кольцу, свободные же ихъ концы снабжены зажимами. Токъ i_1 входитъ чрезъ A и выходитъ чрезъ C; токъ i_2 входитъ чрезъ B и выходитъ чрезъ D. Необходимо, слѣдовательно, четыре проволоки для провода тока. Не трудно тотчасъ же замѣтить сходство этого индуктора съ индукторомъ Феррариса. Внутри сердечника индуктора помѣщается кольцо или барабанъ изъ листоваго желѣза, подвижный вокругъ своей оси и снабженный замкнутой обмоткой, составленной изъ ряда мѣдныхъ полосъ, уложенныхъ въ отверстія очень близко отъ внѣшней поверхности сердечника арматуры; эти полосы соединены своими концами посредствомъ двухъ мѣдныхъ колецъ. Въ очень небольшихъ двигателяхъ арматуру можетъ составлять просто барабанъ изъ массивнаго прокованнаго желѣза. Двѣ обмотки, составленныя изъ нѣсколькихъ паръ діаметральныхъ полосъ, производятъ вращающееся поле, которое увлекаетъ за собою арматуру двигателя.



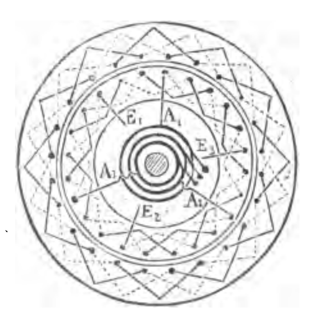
фиг. 43.

На рис. 43 изображенъ трехфазный двигатель того же Общества, аналогичной конструкціи. Индуктирующая обмотка состоитъ изъ шести полосъ A, B, C, D, E, F, припаянныхъ одними своими концами къ мѣдному кольцу. Токъ $i_1 = J \sin mt$ входитъ чрезъ полосу A и выходитъ чрезъ полосу D діаметрально противоположную первой.

Токъ $i_2 = J \sin\left(mt - \frac{2\pi}{3}\right)$ входитъ чрезъ C и выходитъ

чрезъ F; наконецъ $i_3 = J \sin\left(mt - \frac{4\pi}{3}\right)$ входитъ чрезъ E и выходитъ чрезъ B. Вращающееся поле производится, слѣдовательно, тремя обмотками AD, CF, EB. Арматура устроена также, какъ и въ только что описанномъ нами двигателѣ. Токи, необходимые для питанія этихъ двухъ послѣднихъ двигателей, должны быть, очевидно, очень слабаго напряженія и большой силы. Это достигается посредствомъ специальнаго трансформатора, помѣщаемаго здѣсь же возлѣ двигателя. Для перваго изъ этихъ двигателей двѣ вторичныя обмотки трансформатора должны быть вполнѣ независимы. Для трехфазнаго двигателя три вторичныхъ обмотки трансформатора должны также быть независимы; эти обмотки соединяются съ индукторомъ машины посредствомъ шести кабелей.

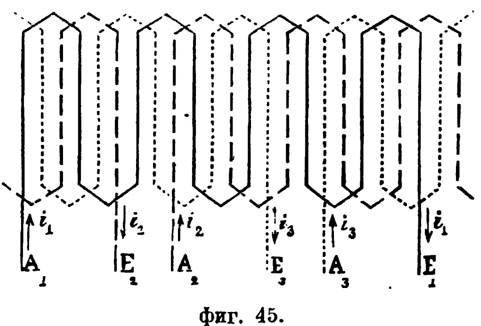
На рис. 44 представлена схема трехфазнаго многополюснаго двигателя Доливо-Добровольскаго и Броуна. Сердечниками индуктора и арматуры служатъ два кольца изъ тонкаго листового желѣза. Въ двигателяхъ значительной работоспособности индукторъ помѣщается внутри арматуры. Такъ какъ число перемѣщеній полюсовъ, образующихся въ желѣзѣ индуктора, равно числу перемѣнъ одного изъ токовъ, то весьма важно довести объемъ этого сердечника до минимума, что достигается помѣщеніемъ индуктора внутри арматуры, въ желѣзѣ которой такія перемѣщенія происходятъ не такъ часто.



фиг. 44.

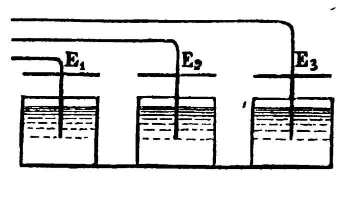
Обмотка индуктора состоитъ изъ трехъ цѣпей, составленныхъ изъ толстыхъ мѣдныхъ полосъ, изолированныхъ азбестомъ и вставленныхъ въ отверстія, сдѣланныя на одинаковомъ разстояніи другъ отъ друга очень близко отъ края кольца. Каждая изъ этихъ обмотокъ образуетъ зиг-

загъ (на рис. 45 изображены три развернутыя обмотки). Ихъ начала A_1, A_2, A_3 соединены съ тремя кольцами



фиг. 45.

щетки которыхъ сообщаются съ тремя проволоками линіи, проводящими токи, отодвинутые на 1/3 періода. Три конца обмотокъ E_1, E_2, E_3 упираются въ три другія кольца, соединенныя съ тремя реостатами съ жидкостью. Эти послѣдніе состоятъ изъ трехъ металлическихъ вазъ (рис. 46), содержащихъ щелочный растворъ и расположенныхъ на одной металлической доскѣ. Вазы снабжены подвижными крышками, къ которымъ прикрѣплены металлическія пластинки; для регулированія скорости двигателя (особенно при пусканіи его въ ходъ) эти пластинки должны быть болѣе или менѣе погружены въ жидкость. Если сообщить между собою вазы, то и концы E_1, E_2, E_3 будутъ соединены непосредственно. Такія сопротивленія могутъ быть также введены для регулированія въ три цѣпи арматуры, если эти послѣднія составлены такъ, какъ цѣпи индуктора (рис. 44). Обмотка арматуры можетъ быть составлена изъ полосъ, соединенныхъ одними своими концами вмѣстѣ посредствомъ мѣднаго круга. Двигатель, изображенный на рис. 44. имѣетъ восемь вращающихся полюсовъ.



фиг. 46.

Для того чтобы получить $2k$ вращающихся полюсовъ. при указанной обмоткѣ. необходимо, очевидно, не менѣе $6k$ полосъ.

Приводимъ ниже нѣкоторыя данныя относительно трехфазнаго двигателя Броуна въ 20 лошадиныхъ силъ. Индукторъ этого двигателя неподвиженъ и находится снаружи; онъ снабженъ тремя обмотками, имѣющими одинъ общій конецъ (соединеніе звѣздочкой).

Внѣшній діаметръ индуктора	500	миллим.
Ширина индуктора	200	»
Напряженіе тока.	80	вольтъ
Число перемѣнъ тока	40	періодовъ
Число оборотовъ арматуры въ минуту .	1200	»
Поперечное сѣченіе проволокъ индуктора.	40	кв. миллим.
Число проволокъ идуктора	90	»
Вѣсъ мѣди индуктора.	20	килогр.
Вѣсъ желѣза индуктора	100	»
Число полосъ арматуры	54	»
Поперечное сѣченіе полосъ арматуры . .	100	кв. миллим.
Вѣсъ мѣди арматуры	15	килогр.
Вѣсъ желѣза арматуры	70	»
Общій вѣсъ двигателя.	420	»
Разница скорости хода при полной нагрузкѣ и безъ нагрузки	3%	

Сердечники устроены такъ, какъ въ двигателѣ, который мы только что описали. Двигатель Броуна приходитъ въ движеніе при парѣ сопротивленія, соотвѣтствующей 20 лошадинымъ силамъ; онъ не останавливается даже при значительной перегрузкѣ и дѣйствуетъ безъ шума. Его отдача опредѣлена приблизительно въ 90%.

На рис. 47 воспроизведена схема кольцеобразнаго индуктора, снабженнаго тремя парами обмотокъ, питаемыхъ трехфазнымъ токомъ и расположенныхъ такимъ образомъ, чтобы производить два вращающихся полюса. Такое устрой-

ство индуктора принадлежитъ Доливо-Добровольскому. Мы уже указали другого рода обмотку, придуманную тѣмъ же изобрѣтателемъ (рис. 17), а именно: кольцо снабжено двѣнадцатью обмотками, по двумъ послѣдовательнымъ изъ нихъ проходитъ два тока, представляющіе разность фазъ въ 30°; такимъ образомъ три тока въ 120° раздѣляются на шесть токовъ, отодвинутыхъ попарно на 30°.

фиг. 47.

Новые двигатели *Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft* имѣютъ арматуру съ замкнутою обмоткою, какъ это описано нами на стр. 84, рис. 43, расположенную внутри индуктора. Этотъ послѣдній представляетъ собою кольцо изъ листового желѣза, въ большихъ двигателяхъ (рис. 42 и 43) индукторъ имѣетъ форму барабана. Двигатели названнаго Общества не снабжены ни кольцами, ни щетками и приведеніе ихъ въ дѣйствіе производится непосредственно безъ реостатовъ. Какъ видно изъ приводимой ниже таблицы сила тока при пусканіи двигателя въ ходъ больше нормальной его силы, но это длится всего нѣсколько секундъ и дѣйствительно поглощаемая двигателемъ въ этотъ моментъ мощность значительно меньше кажущейся мощности.

Принято употреблять токи съ возможно меньшимъ числомъ перемѣнъ, но съ тѣмъ, конечно, чтобы это не увеличивало значительно стоимости трансформаторовъ и не устраняло возможности употребленія лампъ съ вольтовою дугою, правильное дѣйствіе которыхъ, какъ извѣстно, требуетъ, чтобы число перемѣнъ тока въ секунду не опускалось ниже извѣстнаго предѣла. Принимаютъ число перемѣнъ тока равное 50-ти періодамъ въ секунду при эффек-

тивномъ напряженіи въ 60 вольтовъ между одной какой нибудь проволокой и центромъ звѣздочки или что то же при напряженіи въ 100 вольтовъ между двумя какими нибудь проволоками.

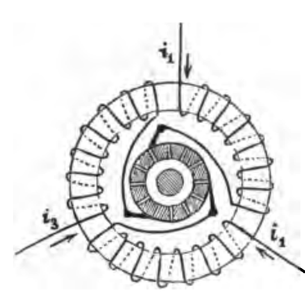
Эти двигатели, изслѣдованные Доливо-Добровольскимъ, отличаются очень простою конструкціею и ихъ отдача, какъ видно изъ таблицы, довольно значительна.

Трехфазные двигатели Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft *).

ОБРАЗЦЫ.	DR 1	DR 5	DR 10	DR 50	DR 500
Нормальная работоспособность, въ лошадяхъ	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{2}$	1	5	50
Число полюсовъ.	2	4	4	4	8
Вѣсъ въ килограммахъ	18	65	94	245	1200
Токъ въ каждой цѣпи при пусканіи двигателя въ ходъ . .	»	»	20	50	400
Токъ въ каждой цѣпи при нормальной нагрузкѣ	1,4	4	8	36	280
Токъ въ каждой цѣпи безъ нагрузки	»	»	4,5	15	150
Электрическая мощность, поглощаемая при пусканіи двигателя въ ходъ, въ килоуаттахъ.	»	»	1,4	5,65	50
Электрическая мощность, поглощаемая при нормальной нагрузкѣ	0,23	0,52	0,985	4,38	40,2
Угловая скорость при нормальной нагрузкѣ (число оборотовъ въ минуту)	2300	1400	1375	1395	725
Угловая скорость безъ нагрузки.	2380	1490	1490	1490	745
Предѣльная теоретическая угловая скорость	3000	1500	1500	1500	750
Промышленная отдача при нормальной нагрузкѣ	»	0,71	0,75	0,84	0,91
Пара пусканія въ ходъ въ мкгр.	»	»	0,52	2,6	49,4

*) L'Industrie électrique du 10 mai 1893.

На рис. 48 изображена схема трехфазнаго двигателя фирмы «Сименсъ и Гальске». Этотъ двигатель состоитъ изъ неподвижнаго кольца, снабженнаго тремя обмотками, которыя получаютъ три тока i_1, i_2, i_3. Внутри такого индуктора помѣщено кольцо Грамма, подвижное вокругъ своей оси и снабженное обыкновеннымъ коллекторомъ; съ этимъ



фиг. 48.

послѣднимъ соприкасаются три щетки, расположенныя на одномъ и томъ же коромыслѣ и соединенныя съ тремя концами обмотокъ арматуры. Три тока i_1, i_2, i_3, отодвинутые на 120°, порождаютъ во внѣшнемъ кольцѣ вращающееся поле. Внутреннее кольцо, имѣющее соединеніе треугольникомъ, получаетъ токи $i_{1,2}$, $i_{2,3}$, $i_{3,1}$, которые также производятъ вращающееся поле. Благодаря употребленію коллектора, токи проникаютъ во внутреннее кольцо всегда въ однѣ и тѣ же точки, расположенныя въ пространствѣ, какова бы ни была скорость вращенія; вращающееся поле внутренняго кольца дѣлаетъ, слѣдовательно, одинъ оборотъ въ продолженіи періода точно также, какъ и поле неподвижнаго кольца.

Если укрѣпить щетки такимъ образомъ, чтобы эти обѣ системы полей не были направлены по однимъ и тѣмъ же радіусамъ, то подвижное кольцо будетъ стремиться приблизить одинъ изъ своихъ полюсовъ, напримѣръ сѣверный, къ противоположному полюсу внѣшняго кольца; но дѣйствіе коллектора удержитъ эти полюсы на извѣстномъ разстояніи, зависящемъ отъ расположенія щетокъ. Если щетки расположены такъ, что полюсы двухъ колецъ находятся другъ противъ друга, то двигатель не будетъ вращаться; отъ укрѣпленія щетокъ вправо или влѣво отъ этого положенія будетъ зависѣть вращеніе двигателя также вправо или влѣво. Скорость вращенія двигателя будетъ, очевидно, увеличиваться въ извѣстныхъ предѣлахъ

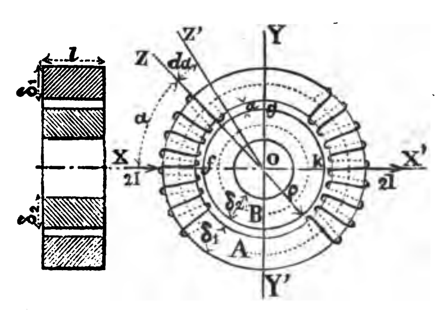
въ зависимости отъ угла, образуемаго щетками. Это свойство двигателей весьма важно въ примѣненіи ихъ къ электрической тягѣ. Другіе двигатели Сименса имѣютъ аналогичную конструкцію; только коллекторъ въ нихъ замѣненъ тремя изолированными кольцами, съ которыми соприкасаются три щетки.

ГЛАВА VI.

Вычисленіе азинхроничнаго двигателя.

Разсмотрѣніе магнитнаго поля, производимаго кольцомъ Грамма питаемымъ въ двухъ діаметрально противоположныхъ точкахъ.

Пусть будетъ A сердечникъ изъ мягкаго желѣза, снабженный непрерывной обмоткой, въ родѣ кольца Грамма расположимъ концентрически къ A другой сердечникъ B также изъ мягкаго желѣза. Пропустивъ въ обмотку A постоянный токъ 2 I, входящій въ X и выходящій изъ X′, мы будемъ имѣть какъ бы два согнутые электромагнита, соединенные одноименными полюсами и возбуждаемые токомъ I.



фиг. 49.

Такимъ образомъ, кольцо A будетъ шунтировано магнетически по своей длинѣ кольцомъ B. Разсмотримъ распредѣленіе линій силъ въ сердечникахъ и въ междужелѣзномъ пространствѣ.

Пусть будетъ:

l общая длина сердечниковъ по оси;

ρ внѣшній радіусъ внутренняго сердечника B;

δ_1, и δ_2 радіальныя толщины сердечниковъ;

a радіальная толщина междужелѣзнаго пространства;

z число оборотовъ возбудителей на сантиметръ развертыванія средней фибры A, предполагая это развертываніе постояннымъ въ каждой точкѣ этой фибры.

$h = 4 \pi z I$ магнетизирующая сила обмотки на сантиметръ развертыванія средней фибры A;

I выражено въ единицахъ C.G.S.

μ проницаемость сердечниковъ A и B, предполагая ее постоянною;

v_1 магнитный потенціалъ въ какомъ нибудь меридіональномъ сѣченіи OZ сердечника A, предполагая этотъ потенціалъ постояннымъ на всемъ протяженія сѣченія;

v_2 магнитный потенціалъ въ сѣченіи OZ' кольца B, предполагая этотъ потенціалъ также постояннымъ на всемъ протяженіи сѣченія;

b все число линій силъ въ кольцѣ A, пронизывающихъ перпендикулярно меридіональное сѣченіе OZ и считаемыхъ положительными по направленію XYX';

b' все число линій силъ въ сѣченіи OZ' кольца B;

β плотность индукціи въ междужелѣзномъ пространствѣ въ плоскости OZ, считаемая положительною по направленію ZO.

Мы допустимъ, что магнитныя отвѣтвленія, направленныя въ воздухъ внѣ междужелѣзнаго пространства, могутъ быть не приняты во вниманіе т. е., что всѣ линіи силъ, производимыя A, замыкаются междужелѣзнымъ пространствомъ и B.

Легко видѣть, что въ силу сдѣланнаго нами предположенія:

(1) $$b' = -b$$

Имѣемъ:

(2) $$d h = 4 \pi z I \left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2} \right) d \alpha$$

(3) $$d v_1 = \left(4\pi z I - \frac{b}{\mu . l \delta_1}\right) \left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) d\alpha$$

(4) $$d v_2 = \frac{b}{\mu l \delta_2}\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) d\alpha$$

Число линій силъ въ междужелѣзномъ пространствѣ между плоскостями OZ и OZ' равно $\beta . l . \rho . d\alpha$ или:

$$\beta l \rho d\alpha = \frac{\frac{v_1 - v_2}{a}}{l \rho d\alpha}$$

Плотность индукціи β въ плоскости OZ, въ междужелѣзномъ пространствѣ, будетъ слѣдовательно:

(5) $$\beta = \frac{v_1 - v_2}{a}$$

Съ другой стороны имѣемъ, очевидно:

(6) $$\beta . l . \rho d\alpha = - d b$$

Дифференцируя равенства (5) и (6), будемъ имѣть:

(7) $$d\beta = \frac{d v_1 - d v_2}{a}$$

(8) $$l \rho d \beta \delta \alpha = - d^2 b$$

Откуда:

(9) $$d\beta = -\frac{d^2 b}{l \rho d\alpha} = \frac{d v_1 - d v_2}{a}$$

и

(10) $$\frac{d^2 b}{d\alpha^2} = -\frac{l \rho}{a} \times \frac{d v_1 - d v_2}{d\alpha}$$

Подставимъ въ (10) вмѣсто $d v_1$, и $d v_2$ ихъ величины изъ (3) и (4), получимъ:

(11) $$\frac{d^2 b}{d\alpha^2} = b \frac{\rho}{\mu . a}\left(\frac{\rho + a + \frac{\delta_1}{2}}{\delta_1} + \frac{\rho - \frac{\delta_2}{2}}{\delta_2}\right)$$

$$-\frac{l\rho 4\pi z I}{a}\left(\rho+a+\frac{\delta_1}{2}\right)$$

Положимъ:

(12) $$\frac{\rho}{\mu a}\left(\frac{\rho+a+\frac{\delta_1}{2}}{\delta_1}+\frac{\rho-\frac{\delta_2}{2}}{\delta_2}\right)=m$$

(13) $$\frac{l\rho 4\pi z I}{a}\left(\rho+a+\frac{\delta_1}{2}\right)=p$$

(11) обратится въ:

(14) $$\frac{d^2 b}{d\alpha^2}=mb-p$$

Откуда:

(15) $$\alpha=\int_o^b\frac{db}{\sqrt{\int_o^b(2\,mb\,db-2pd\,b)+C}}+C'$$

C и C′ постоянныя интегрированія. Положивъ:

(16) $$\frac{p}{m}=q$$

$$\frac{C}{m}=C_1$$

$$C'\sqrt{m}=C'_1=\text{Log. }C'_2$$

будемъ имѣть, произведя интегрированіе:

(17) $$b=q+\frac{C'_2}{2}e^{\sqrt{m}\,\alpha}+\frac{q^2-C_1}{C'_2}e^{-\sqrt{m}\,\alpha}$$

Предположимъ:

$$\frac{C'_2}{2}=K \qquad \frac{q^2-C_1}{2\,C'_2}=K'$$

(17) обратится въ:

$$b = q + K e^{\sqrt{m}\alpha} + K' e^{-\sqrt{m}\alpha}$$

Такъ какъ два полукольца A расположены симметрично по отношенію къ XX′, то магнитный потокъ мѣняетъ знакъ въ X и въ X′, проходя съ одной половины кольца въ другую; онъ обращается, слѣдовательно, въ нуль при $\alpha = o$ и при $\alpha = \pi$. Такимъ образомъ постоянныя K и K′ опредѣляются изъ равенствъ:

(18) $$o = q + K + K'$$

(19) $$o = q + K e^{\sqrt{m}\pi} + K' e^{-\sqrt{m}\pi}$$

Откуда получаемъ окончательно:

(20) $$b = q\left[1 - \frac{e^{\sqrt{m}\pi} - 1}{e^{2\sqrt{m}\pi} - 1} e^{\sqrt{m}\alpha} - \frac{e^{\sqrt{m}\pi} - 1}{e^{2\sqrt{m}\pi} - 1} e^{\sqrt{m}(\pi - \alpha)}\right]$$

Имѣемъ въ силу (6), (16) и (20):

(21) $$\beta l = -\frac{1}{\rho}\frac{d\,b}{d\,\alpha} = \frac{p}{\sqrt{m}\,\rho}\frac{e^{\sqrt{m}\pi} - 1}{e^{2\sqrt{m}\pi} - 1}\left[e^{\sqrt{m}\alpha} - e^{\sqrt{m}(\pi - \alpha)}\right]$$

Это отношеніе показываетъ, что β обращается въ нуль при $\alpha = \frac{\pi}{2}$; слѣдовательно, плотность индукціи въ междужелѣзномъ пространствѣ въ плоскости OY равна нулю.

Такъ какъ:

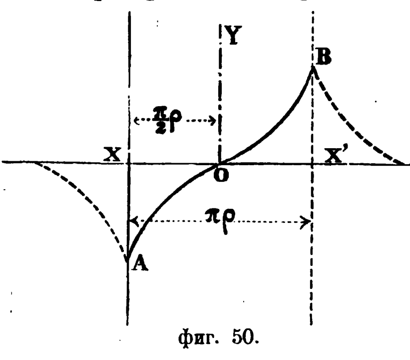
$$\frac{d\,b}{d\,\alpha} = -\beta\, l\rho$$

то максимумъ b будетъ при $\alpha = \frac{\pi}{2}$; иначе говоря, число линій силъ въ сердечникахъ будетъ имѣть свой макси-

мумъ въ сѣченіи OY, этотъ максимумъ равенъ для сердечника A:

$$b_{max} = q\left[1-2\frac{e^{\sqrt{m}\pi}-1}{e^{2\sqrt{m}\pi}-1}e^{\sqrt{m}\frac{\pi}{2}}\right] \tag{22}$$

Уравненіе (21), выражая силу поля въ междужелѣзномъ пространствѣ въ различныхъ точкахъ полукруга fgk, представляетъ кривую, общая форма которой подобна линіи AOB (рис. 50).



фиг. 50.

Очевидно, что такое распредѣленіе линій силъ не даетъ значительнаго средняго поля въ междужелѣзномъ пространствѣ. Въ противномъ случаѣ максимумъ этого поля былъ бы чрезмѣренъ, что породило бы значительную магнитную потерю.

Посмотримъ теперь, каково должно быть распредѣленіе возбужденія въ кольцѣ A, чтобы плотность поля въ междужелѣзномъ пространствѣ измѣнялась, какъ ординаты синусоиды.

Пусть будетъ β_m максимумъ плотности въ междужелѣзномъ пространствѣ. Будемъ считать углы отъ O Y по направленію къ XX'; будемъ имѣть, согласно опредѣленію:

$$\beta = \beta_m \sin\alpha \tag{1}$$

Имѣемъ, какъ и раньше:

$$\beta l \rho d\alpha = -db \tag{2}$$

Откуда:

(3) $$db = -\beta_m l \rho \sin\alpha d\alpha$$

Интегрируя это уравненіе, получимъ:

(4) $$b = \beta_m l \rho \cos\alpha$$

Постоянная интегрированія равна нулю, такъ какъ b обращается въ нуль при $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Кромѣ того, имѣемъ какъ и раньше:

$$\beta l \rho d\alpha = \frac{\frac{v_1 - v_2}{a}}{l \rho d\alpha}$$

или:

(5) $$v_1 - v_2 = a \beta_m \sin\alpha$$

(6) $$dv_1 = dh - \frac{\beta_m l \rho \left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) \cos\alpha d\alpha}{\mu l \delta_1}$$

(7) $$dv_2 = \frac{\beta_m l \rho \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) \cos\alpha d\alpha}{\mu l \delta_2}$$

Дифференцируемъ (5) и, подставивъ вмѣсто dv_1 и dv_2 ихъ величины изъ (6) и (7), получимъ:

$$a \beta_m \cos\alpha d\alpha = dv_1 - dv_2$$

$$= dh - \frac{\beta_m \rho}{\mu} \left[\frac{\rho + a + \frac{\delta_1}{2}}{\delta_1} + \frac{\rho - \frac{\delta_2}{2}}{\delta_2}\right] \cos\alpha d\alpha$$

(8) $$dh = a \beta_m \cos\alpha d\alpha + \frac{\beta_m \rho}{\mu} \left[\rho \left(\frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_2}\right) + \frac{a}{\delta_1}\right] \cos\alpha d\alpha$$

Интегрируя это уравненіе, находимъ:

$$(9)\quad h = \beta_m \left[a + \frac{\rho}{\mu} \left(\rho \left(\frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_2} \right) + \frac{a}{\delta_1} \right) \right] \sin \alpha$$

Съ другой стороны:

$$(10)\qquad h = 4\pi \int_{\alpha = 0}^{\alpha = \alpha} d\, n\, \mathrm{I}$$

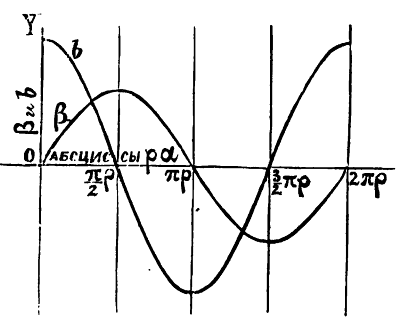
т. е., что h обозначаетъ возбужденіе, производимое частью обмотки, находящейся между плоскостью O Y и меридіональною плоскостью O Z, соотвѣтствующей углу α. Уравненіе (9) показываетъ, что *это возбужденіе должно увеличиваться съ увеличеніемъ синуса угла* α. Уравненіе (8) показываетъ, что *возбужденіе на сантиметръ развертыванія кольца A, въ различныхъ точкахъ окружности, должно измѣняться, какъ косинусъ угловъ* α, *опредѣляющихъ положенія этихъ точекъ.*

Это измѣняющееся возбужденіе имѣетъ своимъ выраженіемъ nI, n число оборотовъ на сантиметръ въ разсматриваемой точкѣ и I токъ (въ единицахъ C. G. S), проходящій по этимъ оборотамъ. Можно, слѣдовательно, получить это измѣняющееся возбужденіе въ различныхъ точкахъ кольца тремя способами:

1. Принимая I постояннымъ и измѣняя n какъ $\cos\alpha$;

2. Принимая n постояннымъ и измѣняя I какъ $\cos\alpha$;

3. Измѣняя совмѣстно n и I.



фиг. 51.

При вычисленіи двигателя съ вращающимся полемъ, мы разсмотримъ второй изъ этихъ способовъ.

На рис. 51 за абсциссы приняты развернутыя дли-

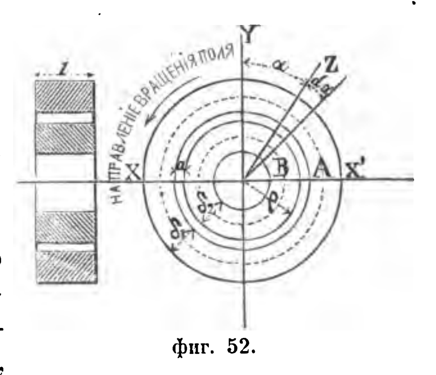
ны дугъ $\rho\alpha$ внѣшняго круга кольца B и за ординаты величины плотности индукціи β въ междужелѣзномъ пространствѣ и всей индукціи b въ сердечникѣ A въ той же самой меридіональной плоскости.

Индукція въ B изобразится симметричной кривой. Эти діаграммы представляютъ собою синусоиды. Вся индукція b равна нулю въ сѣченіяхъ O X и O X'; ея максимумъ будетъ въ плоскости O Y, раздѣляющей возбуждающую обмотку на двѣ равныя части. Плотность индукціи β въ междужелѣзномъ пространствѣ запаздываетъ на 90^0 относительно b. Она имѣетъ свой отрицательный максимумъ въ плоскости O X, равна нулю въ плоскости O Y и имѣетъ свой положительный максимумъ въ плоскости O X'. Вторая половина діаграммы получается отъ нижней половины колецъ.

Замѣтимъ еще (уравненіе 4), что b *измѣняется какъ* $\cos\alpha$, *т. е. какъ возбужденіе на сантиметръ длины въ томъ же сѣченіи.*

Вычисленіе азинхроничнаго двигателя съ двумя полюсами.

Предположимъ, что кольцо A снабжено обмоткою, состоящей изъ множества безконечно тонкихъ оборотовъ, на концахъ которыхъ напряженіе e было бы подвержено колебаніямъ одинаковаго періода T, одинаковаго максимума ε, но различныхъ фазъ, такъ, чтобы вся индукція b въ сѣченіи сердечника какою нибудь меридіональною плоскостью была пропорціональна синусу угла XOZ,



фиг. 52.

увеличенному на уголъ $\frac{2\pi t}{T} = 2\pi nt = mt$, T періодъ пол-

наго колебанія и n число колебаній въ секунду. Это все равно, какъ бы полное колебаніе распространялось по всей окружности въ промежутокъ времени Т.

Назовемъ черезъ b_m максимумъ всей индукціи b въ индуктирующемъ сердечникѣ А, черезъ β_m максимумъ плотности индукціи β въ междужелѣзномъ пространствѣ и примемъ за начало угловъ меридіональную плоскость OY.

Такимъ образомъ, величины b и β въ какой нибудь меридіональной плоскости OZ и въ какой нибудь моментъ t опредѣлятся, согласно сдѣланному нами предпоположенію, изъ отношеній:

$$(1)\quad b_t = b_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + 2\pi n t\right)$$

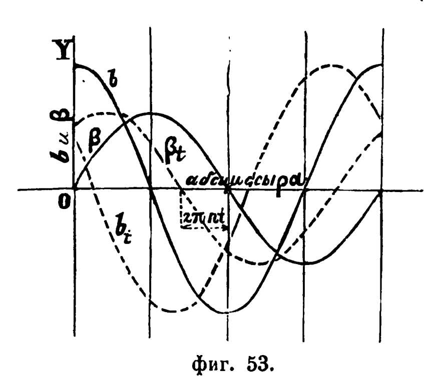
$$(2)\qquad \beta_t = \beta_m \sin(\alpha + 2\pi n t)$$

При t = о будемъ имѣть:

$$(3)\qquad b = b_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)$$

$$(4)\qquad \beta = \beta_m \sin \alpha$$

Отношенія (3) и (4) даютъ діаграммы b и β, изображенныя сплошными линіями (рис. 53), тождественными съ линіями рис. 51. Отношенія (1) и (2) даютъ діаграммы b_t и β_t, изображенныя пунктирными линіями; эти діаграммы такія же, какъ и первыя, но онѣ отодвинуты онтносительно первыхъ, на рисункѣ влѣво, на величину $2\pi nt$.



фиг. 53.

Поле въ междужелѣзномъ пространствѣ вращается, слѣдовательно, всѣмъ своимъ цѣлымъ съ постоянною угловою скоростью 2πn, оставаясь всегда тождественнымъ

самому себѣ. Въ разсматриваемомъ нами примѣрѣ это поле дѣлаетъ вокругъ оси двигателя одинъ оборотъ въ продолженіи періода или n оборотовъ въ секунду.

Легко видѣть, что происходящія при этомъ явленія тождественны въ каждый моментъ, за исключеніемъ положенія ихъ въ пространствѣ.

Намъ достаточно, слѣдовательно, для изученія явленій индукціи и вычисленія вращающей пары разсмотрѣть двигатель, *при его нормальномъ дѣйствіи,* въ одинъ какой нибудь моментъ, напримѣръ въ моментъ $t = o$, и заставить вращаться поле междужелѣзнаго пространства со скоростью $2\pi n$.

Допустимъ, какъ и раньше, что магнитная потеря черезъ воздухъ можетъ быть не принята во вниманіе и что индукція въ желѣзѣ пропорціональна магнито-двигательной силѣ или, что все равно, будемъ разсматривать проницаемость сердечниковъ, какъ постоянную, какова бы ни была плотность индукціи, и принебрежемъ гистерезисомъ и токами Фуко.

Вообразимъ сердечникъ B окруженнымъ по всей своей периферіи множествомъ соединенныхъ металлическихъ оборотовъ, безконечно тонкихъ и замкнутыхъ на себя; такая обмотка составитъ, такъ сказать, однообразный футляръ, по которому индуктируемые токи могутъ проходить, по лимбѣ сердечника B, только по направленію образующихъ этого цилиндра.

Будемъ имѣть, слѣдовательно, какъ и раньше въ моментъ $t = o$:

$$\beta l \rho = -\frac{db}{d\alpha} \tag{5}$$

Легко видѣть, что приращеніе $\frac{db'}{d\alpha}d\alpha$ всей индукціи въ сердечникѣ B равно и имѣетъ знакъ обратный $\frac{db}{d\alpha}d\alpha$ т. е.:

$$\frac{db'}{d\alpha}d\alpha = -\frac{db}{d\alpha}d\alpha \tag{6}$$

Откуда:

$$(7) \qquad b' = -b$$

Сохранимъ тѣ же обозначенія, какъ и въ предшествовавшемъ примѣрѣ; пусть будетъ:

r_1 сопротивленіе обмотки A на сантиметръ ширины, считая по средней окружности A;

r_2 сопротивленіе индуктируемой обмотки на сантиметръ ширины, считая по средней окружности B;

i_1 токъ возбудитель на сантиметръ ширины, считая по средней окружности A;

i_2 индукціонный токъ въ обмоткѣ B на сантиметръ ширины, считая по средней окружности B;

n' число оборотовъ B въ секунду, при нормальномъ дѣйствіи двигателя.

M вращающая пара.

Будемъ имѣть очевидно:

$$(8) \quad \frac{r_2}{\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) d\alpha} i_2 \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) d\alpha = -2\pi l \rho (n - n') \beta_m \sin\alpha$$

Откуда:

$$(9) \qquad i_2 = -\frac{2\pi\rho l (n - n') \beta_m \sin\alpha}{r_2}$$

Кромѣ того, имѣемъ какъ и раньше:

$$(10) \quad d v_1 = 4\pi i_1 \left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) d\alpha - b \frac{\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) d\alpha}{\mu l \delta_1}$$

$$(11) \quad d v_2 = 4\pi i_2 \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) d\alpha + b \frac{\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) d\alpha}{\mu l \delta_2}$$

Число линій силъ въ междужелѣзномъ пространствѣ, между двумя плоскостями безконечно близкими другъ къ другу, будетъ:

$$\beta l \rho d\alpha = \frac{\frac{v_1 - v_2}{a}}{l \rho d\alpha}$$

или:

$$(12) \qquad \beta = \frac{v_1 - v_2}{a}$$

Откуда выводимъ:

$$(13) \qquad \frac{d\beta}{d\alpha} d\alpha = \frac{dv_1 - dv_2}{a}$$

Имѣемъ очевидно:

$$(14) \begin{cases} \dfrac{dM}{d\alpha} d\alpha = -\rho\beta l i_2 \left(\rho - \dfrac{\delta_2}{2}\right) d\alpha \\ = \dfrac{2\pi l^2 \rho^2 \left(\rho - \dfrac{\delta_2}{2}\right)(n - n')}{r_2} \beta^2 d\alpha \end{cases}$$

Двигающая пара M будетъ имѣть, слѣдовательно, своимъ выраженіемъ:

$$(15) \begin{cases} M = 4 \displaystyle\int_{\alpha=o}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} \dfrac{2\pi \rho^2 l^2 \left(\rho - \dfrac{\delta_2}{2}\right)(n - n')}{r_2} \beta^2 d\alpha \\ = \dfrac{2\pi^2 \rho^2 l^2 \left(\rho - \dfrac{\delta_2}{2}\right)(n - n') \beta^2{}_m}{r_2} \end{cases}$$

M двигающая пара, дѣйствующая на ось пріемника; вслѣдствіе тренія шиповъ она немного больше пары сопротивленія, приложенной къ шкиву. Зная размѣры

шкива и шиповъ, выводятъ изъ нихъ пару тренія, которая будетъ равна части k пары сопротивленія у шкива.

Если обозначимъ черезъ P полезную работоспособность двигателя, то будемъ имѣть:

$$(16) \qquad M = (1 + k)\frac{P}{2\pi n'},$$

Величина $(n - n')$ выражаетъ *приблизительно* разность между числомъ оборотовъ въ секунду двигателя безъ нагрузки и числомъ оборотовъ при полной нагрузкѣ; это было бы вполнѣ такъ, еслибы пріемникъ имѣлъ отдачу равную единицѣ. На практикѣ разность между числами оборотовъ въ секунду безъ нагрузки и при полной нагрузкѣ немного меньше $n - n'$.

Обыкновенно стараются имѣть это замедленіе $n - n'$ такимъ, чтобы $\frac{n - n'}{n}$ составляло извѣстный процентъ, напримѣръ 3 на 100.

Если, кромѣ того, извѣстна наибольшая плотность индукціи въ междужелѣзномъ пространствѣ β_m и найдены ρ и l способомъ, который будетъ нами указанъ дальше, то сопротивленіе r_2 опредѣлится изъ уравненія (15):

$$(17) \qquad r_2 = \frac{2\pi^2 \rho^2 l^2 \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)(n - n')\beta_m^2}{M}$$

всѣ множители второй части этого равенства извѣстны. Токъ i_2 вполнѣ опредѣленъ уравненіемъ (9).

Изъ (9) и (17) получаемъ:

$$(18) \qquad i_2 = -\frac{M}{\pi l \rho \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)\beta_m} \sin\alpha$$

Кромѣ того, имѣемъ:

$$(19) \qquad b = -\rho l \beta_m \int \sin\alpha \, d\alpha = \rho l \beta_m \cos\alpha$$

Подставимъ въ (13) вмѣсто $\frac{d\beta}{d\alpha}$, dv_1 и dv_2 ихъ величины изъ (4), (10) и (11), получимъ:

$$(20)\ a\beta_m \cos\alpha\, d\alpha = 4\pi i_1\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha - b\,\frac{\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha}{\mu l \delta_1}$$

$$-4\pi i_2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)d\alpha - b\,\frac{\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)d\alpha}{\mu l \delta_2}$$

Отсюда, принимая во вниманіе (18) и (19):

$$(21)\ i_1 = \left[\frac{a}{4\pi\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)} + \frac{\rho}{4\pi\mu\delta_1} + \frac{\rho\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)}{4\pi\mu\delta_2\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)}\right]$$

$$\times \beta_m \cos\alpha - \frac{1}{\pi\rho l\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)} \times \frac{M}{\beta_m}\sin\alpha$$

Положимъ:

$$(22)\quad \frac{a}{4\pi\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)} + \frac{\rho}{4\pi\mu\delta_1} + \frac{\rho\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)}{4\pi\mu\delta_2\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)} = A$$

$$(23)\quad \frac{1}{\pi\rho l\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)} = B$$

Тогда равенство (21) обратится въ:

$$(24)\quad i_1 = A\beta_m \cos\alpha - B\frac{M}{\beta_m}\sin\alpha$$

Положимъ еще:

$$\frac{A\beta_m}{B\frac{M}{\beta_m}} = tg\,\psi \tag{25}$$

Тогда (24) обратится въ:

$$i_1 = -\sqrt{A^2\beta_m^2 + B^2\frac{M^2}{\beta_m^2}}\sin(\alpha - \psi) \tag{26}$$

Отношеніе (25) показываетъ, что уголъ ψ уменьшается отъ $\frac{\pi}{2}$ до o, когда вращающая пара M увеличивается отъ o до ∞. Уравненія (18) и (26) приводятъ къ заключенію, что, въ какой-либо меридіональной плоскости OZ, фаза индуктируемаго тока i_2 запаздываетъ на ψ относительно фазы индуктирующаго тока i_1; это запозданіе было бы равно $\frac{\pi}{2}$ при $M=0$ (мы уже сказали, что при дѣйствіи двигателя, вслѣдствіе пассивныхъ сопротивленій, M никогда не можетъ быть равно нулю), оно стремится къ o, когда M приближается къ ∞. Слѣдовательно, по мѣрѣ того какъ нагрузка двигателя увеличивается, фазы двухъ токовъ стремятся совпасть.

Токи i_1 и i_2 имѣютъ свой максимумъ:

$$J_1 = \sqrt{A^2\beta_m^2 + B^2\frac{M^2}{\beta_m^2}} \tag{27}$$

$$J_2 = \frac{M}{\pi\, l\, \rho\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)\beta_m} \tag{28}$$

Индуктирующій токъ i_1 въ какой-либо меридіональной плоскости OZ и въ какой-нибудь моментъ t будетъ имѣть своимъ выраженіемъ:

$$i_1 = -J_1\sin(\alpha - \psi + 2\pi nt) \tag{29}$$

Напряженіе e у зажимовъ разсматриваемаго оборота въ моментъ t будетъ:

$$(30) \qquad e = r_1 i_1 + \frac{d\,b}{d\,t} dt$$

Такимъ образомъ:

$$(31) \quad b = b_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + 2\pi nt\right) = \frac{\rho}{\pi} l\,\beta_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + 2\pi nt\right)$$

Слѣдовательно:

$$(32) \quad \begin{cases} e = - r_1 J_1 \sin(\alpha - \psi + 2\pi nt) \\ \qquad + \rho l 2\pi n \beta_m \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + 2\pi nt\right) \\ = - r_1 J_1 \sin(\psi - \alpha + 2\pi nt) \\ \qquad - \rho l 2\pi n \beta_m \sin(\alpha + 2\pi nt) \end{cases}$$

Разложивъ второй членъ этого уравненія, будемъ имѣть:

$$(33) \qquad e = - r_1 J_1 \cos\psi \sin(\alpha + 2\pi nt)$$

$$+ r_1 J_1 \sin\psi \cos(\alpha + 2\pi nt) - \rho l 2\pi n \beta_m \sin(\alpha + 2\pi nt)$$

Подставимъ вмѣсто J_1, Sin ψ и Cos ψ ихъ величины и положимъ:

$$(34) \qquad \frac{r_1 A \beta_m}{r_1 B \frac{M}{\beta_m} + \rho l 2\pi n \beta_m} = tg\,\chi$$

Будемъ имѣть:

$$(35) \quad e = -\sqrt{(r_1 A \beta_m)^2 + \left(r_1 B \frac{M}{\beta_m} + \rho l 2\pi n \beta_m\right)^2} \times \sin(\alpha - \chi + 2\pi nt)$$

абсолютный максимумъ котораго есть:

$$(36) \quad e_{max} = \sqrt{(r_1 A \beta_m)^2 + \left(r_1 B \frac{M}{\beta_m} + \rho l 2\pi n \beta_m\right)^2}$$

Напряженіе e у зажимовъ какого-нибудь индуктирующаго оборота должно, слѣдовательно, измѣняться, подобно

синусоидѣ, вмѣстѣ съ положеніемъ этого оборота въ данный моментъ и со временемъ t для даннаго положенія α.

Отношеніе (34) показываетъ, что

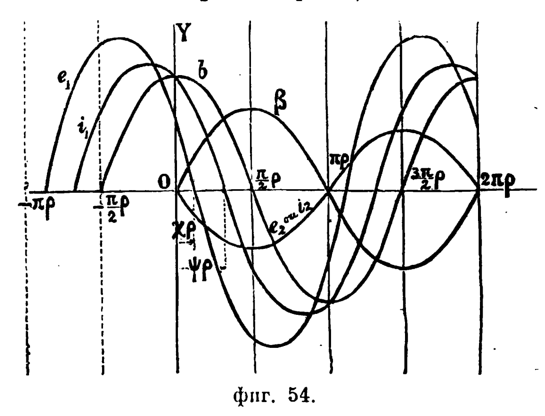
$$\chi < \psi$$

т. е., что фаза напряженія e у зажимовъ какого-нибудь индуктирующаго оборота находится впереди относительно тока i_1 въ этомъ оборотѣ на уголъ:

$$\psi - \chi$$

Впрочемъ, это уклоненіе уменьшается по мѣрѣ того какъ вращающая пара M увеличивается. Кромѣ того, если r_1 очень мало, а M соотвѣтствуетъ нормальной нагрузкѣ двигателя, то можно сдѣлать χ также очень малымъ.

Діаграмма (рис. 54) изображаетъ различныя величины, которыя мы только что разсмотрѣли, въ ихъ соотвѣтственныхъ фазахъ.



фиг. 54.

При очень большой величинѣ вращающей пары M, e_1, i_1 и i_2 почти совпадаютъ фазами; при M=o, i_1 совпадаетъ фазою съ индукціею b въ сердечникѣ A.

Замѣтимъ еще, что при слабой нагрузкѣ индуктирующій токъ i_1 отодвигается впередъ относительно напряженія e_1.

Второе изъ отношеній (32) выражаетъ, *что напряженіе у зажимовъ какого-нибудь индуктирующаго оборота равно*

алгебраической разности числа линій силъ междужелѣзнаго пространства, пронизывающихъ, вслѣдствіе вращенія поля, въ продолженіе секунды внутреннюю сторону этого оборота, и потери напряженія $r_1\ i_1$, производимой прохожденіемъ тока по этому обороту. Это напряженіе у зажимовъ оборота имѣетъ знакъ обратный знаку означенной разности.

Потеря мощности, происходящая вслѣдствіе сопротивленія индуктирующей обмотки, будетъ:

$$W_1 = 4 \int_{i_1=o}^{i_1=J_1} \frac{r_1}{\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) d\,\alpha} \left[i_1 \left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) d\,\alpha \right]^2$$

$$(37) \qquad = \pi \left[\rho + a + \frac{\delta_1}{2} \right] r_1\, J_1^2$$

Потеря мощности въ индуктируемой обмоткѣ равна:

$$(38) \begin{cases} W_2 = 4 \displaystyle\int_{i_2=o}^{i_2=J_2} \frac{r_2}{\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) d\,\alpha} \left[i_2 \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) d\,\alpha \right]^2 \\ = \pi \left(\rho - \frac{\delta_2'}{2}\right) r_2\, J_2^2 = \dfrac{r_2\, M^2}{\pi\, l^2\, \rho^2 \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) \beta_m^2} \\ = 2\,\pi\,(n - n')\, M \end{cases}$$

Слѣдовательно, потеря мощности въ арматурѣ численно равна произведенію вращающей пары на потерю угловой скорости, что можно было предвидѣть съ механической точки зрѣнія.

Если размѣры сердечника A извѣстны, то изъ β_m или b_m можно опредѣлить плотность максимальной индукціи

въ желѣзѣ $\frac{b}{l\,\delta_1}$; если же объемъ сердечника, число перемѣнъ тока, а также родъ желѣза извѣстны, то легко вычислить приблизительно потерю мощноети W, производимую гистерезисомъ и токами Фуко; такъ какъ колебанія магнетизма въ сердечникѣ относительно очень слабы, то прежде всего возможно пренебречь происходящей отъ этого потерей.

Пусть будетъ P полезная работоспособность двигателя и P′ мощность у его зажимовъ; имѣемъ:

$$P' = 4 \int_{i_1 = o}^{i_1 = J_1} e\,i\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) d\,\alpha$$

$$(39) \qquad = \pi\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) e_m\, J_1 \cos(\psi - \chi)$$

Отдача двигателя равна:

$$(40) \qquad \eta = \frac{P}{P + F + W + W_1 + W_2}$$

F выражаетъ мощность, поглощаемую пассивными сопротивленіями.

Замѣтимъ, что всѣ разсмотрѣнныя нами величины выражены въ единицахъ C. G. S.

Вычисленіе двигателя съ нѣсколькими парами полюсовъ.

Идеальный двигатель, который мы только что изучили, будетъ дѣлать приблизительно n оборотовъ въ секунду, n это число перемѣнъ одного колебанія напряженія. Если хотятъ довести эту угловую скорость до величины $\frac{n'}{K}$ близкой къ $\frac{n}{K}$, K цѣлое число, то необходимо построить такой двигатель, который производилъ бы 2 K по-

люсовъ (K полюсовъ сѣверныхъ и K южныхъ), тогда одно какое нибудь изъ вращающихся полей опишетъ въ продолженіи періода уголъ $\frac{2\pi}{K}$, т. е. совершитъ полный оборотъ въ K періодовъ.

Въ этомъ случаѣ вся индукція b въ какомъ нибудь меридіональномъ сѣченіи O Z сердечника A въ моментъ t будетъ имѣть своимъ выраженіемъ:

$$(41) \qquad b = b_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + K\alpha + 2\pi n t\right)$$

и плотность индукціи β въ междужелѣзномъ пространствѣ, въ плоскости O Z, будетъ:

$$(42) \qquad \beta = \beta_m \sin(K\alpha + 2\pi n t)$$

Сдѣлаемъ $t = o$, тогда получимъ для тока i_2:

$$(43) \qquad i_2 = -\frac{\beta l \rho 2\pi\left(\frac{n-n'}{K}\right)}{r_2} = -\frac{l \rho 2\pi\left(\frac{n-n'}{K}\right)\beta_m \sin K\alpha}{r_2}$$

Вращающая пара M будетъ:

$$M = 4K \frac{l^2 \rho^2 \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) 2\pi\left(\frac{n-n_1}{K}\right)}{r_2} \int_{K\alpha = o}^{K\alpha = \frac{\pi}{2}} \beta^2 \, d\alpha$$

$$= 4K \frac{l^2 \rho^2 \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) 2\pi\left(\frac{n-n'}{K}\right)}{r_2} \beta_m^2 \int_{K\alpha = o}^{K\alpha = \frac{\pi}{2}} \sin^2 K\alpha \, d\alpha$$

$$(44) \qquad = \frac{K\, 2\pi^2 l^2 \rho^2 \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)\left(\frac{n-n'}{K}\right)}{r_2} \beta_m^2$$

выраженіе, которое при одинаковыхъ размѣрахъ двигателя и при одинаковой величинѣ плотности максимальной индукціи β_m въ междужелѣзномъ пространствѣ тождествен-

но съ выраженіемъ (15). Въ обоихъ случаяхъ вращающая пара будетъ одна и та же.

Сопротивленіе r_2 обмотки арматуры опредѣлится, слѣдовательно, формулою:

$$(45) \qquad r_2 = \frac{K\, 2\, \pi^2\, l^2\, \rho^2 \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) \frac{n - n'}{K}\, \beta_m^2}{M}$$

И такъ, это сопротивленіе обмотки арматуры на сантиметръ ширины, измѣренной по средней фибрѣ сердечника B, будетъ тоже, при равныхъ размѣрахъ и плотности максимальной индукціи, для двигателя съ одною или съ нѣсколькими парами полюсовъ, если только будетъ допущена въ обоихъ случаяхъ одна и та же относительная потеря угловой скорости между нулевою и полною нагрузкою.

Пусть будетъ N число оборотовъ двигателя въ секунду при нормальной нагрузкѣ; имѣемъ:

$$(46) \qquad \frac{n - n'}{K} = \frac{n}{K} - N$$

Мощность у зажимовъ *индукціонной части* двигателя будетъ:

$$M\, 2\, \pi \left(\frac{n}{K} - N\right)$$

Выводимъ изъ отношеній (43) и (44):

$$(47) \qquad i_2 = -\frac{M}{K\, \pi\, l\, \rho \left(\rho - \frac{\delta}{2}\right) \beta_m} \sin K\alpha$$

Будемъ имѣть, какъ и раньше:

$$(48) \qquad \beta\, l\, \rho = -\frac{d\, b}{d\, \alpha} = -K b_m \cos\left(\frac{\pi}{2} + K\alpha\right)$$

или:

$$(49) \qquad l\, \rho\, \beta_k \sin K\alpha = -K\, b_m \sin K\alpha$$

Откуда:

$$(50) \qquad b_m = \frac{l \rho \beta_m}{K}$$

Имѣемъ еще:

$$(51) \qquad \frac{d\beta}{d\alpha} d\alpha = \frac{dv_1 - dv_2}{a}$$

или:

$$(52) \qquad K a \beta_m \cos K \alpha = 4 \pi i_1 \left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) - 4\pi i_2 \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)$$

$$- b \left[\frac{\rho + a + \frac{\delta_1}{2}}{\mu l \delta_1} - \frac{\rho - \frac{\delta_2}{2}}{\mu l \delta_2}\right]$$

Подставивъ вмѣсто i_2 и b ихъ величины и предположивъ:

$$(53) \qquad \frac{Ka}{4\pi\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)} + \frac{\rho}{4\pi\mu\delta_1 K} +$$

$$+ \frac{\rho\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)}{4\pi\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)\mu\delta_2 K} = A$$

и

$$(54) \qquad \frac{1}{K \pi l \rho\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)} = B$$

будемъ имѣть:

$$(55) \qquad i_1 = A\beta_m \cos K\alpha - B \frac{M}{\beta_m} \sin K\alpha$$

Положимъ:

$$(56) \qquad \frac{A\beta_m}{B\dfrac{M}{\beta_m}} = tg\psi$$

Тогда (55) обратится въ:

$$(57) \qquad i_1 = -\sqrt{A^2\beta_m^2 + B^2\frac{M^2}{\beta_m^2}}\sin(K\alpha - \psi)$$

Слѣдовательно, абсолютный максимумъ токовъ i_1 и i_2 въ индукторѣ и въ арматурѣ выразится величинами:

$$(58) \qquad J_1 = \sqrt{A^2\beta_m^2 + B^2\frac{M^2}{\beta_m^2}}$$

$$(59) \qquad J_2 = \frac{M}{K\,\pi l\rho\left(\rho - \dfrac{\delta_2}{2}\right)\beta_m}$$

Разсмотримъ теперь двигатель въ какой нибудь моментъ t. Напряженіе e у зажимовъ оборота, расположеннаго въ плоскости OZ, будетъ имѣть своимъ общимъ выраженіемъ въ моментъ t:

$$(60) \qquad e = r_1 i_1 + \frac{db}{dt}$$

Итакъ имѣемъ:

$$r_1 i_1 = -r_1 J_1 \sin(K\alpha - \psi + 2\pi nt)$$

$$\frac{db}{dt} = -\frac{l\rho\beta_m}{K}2\pi n\sin(K\alpha + 2\pi nt)$$

Слѣдовательно:

$$(61) \qquad e = -r_1 J_1\sin(K\alpha - \psi + 2\pi nt) - \frac{l\rho\,2\pi n\beta_m}{K}\sin(K\alpha + 2\pi nt)$$

Разложивъ второй членъ этого уравненія и подставивъ вмѣсто J_1, $\sin\psi$ и $\cos\psi$ ихъ величины, будемъ имѣть:

$$(62) \qquad e = r_1 A\beta_m \cos(K\alpha + 2\pi nt)$$

$$-\left(r_1 B \frac{M}{\beta_m} + \frac{l\rho\, 2\pi n\beta_m}{K}\right) \sin(K\alpha + 2\pi nt)$$

Положимъ, какъ и въ предшествующемъ случаѣ:

$$(63) \qquad \frac{r_1 A\beta_m}{r_1 B \frac{M}{\beta_m} + \frac{l\rho\, 2\pi n\beta_m}{K}} = tg\,\chi$$

Тогда (62) обратится въ:

$$(64) \qquad e = -\sqrt{(r_1 A\beta_m)^2 + \left(r_1 B \frac{M}{\beta_m} + \frac{l\rho\, 2\pi n\beta_m}{K}\right)^2}$$

$$\times \sin(K\alpha - \chi + 2\pi nt)$$

абсолютный максимумъ котораго равенъ:

$$(65) \qquad e_m = \sqrt{(r_1 A\beta_m)^2 + \left(r_1 B \frac{M}{\beta_m} + \frac{l\rho\, 2\pi n\beta_m}{K}\right)^2}$$

e_m будетъ, слѣдовательно, максимумъ разности потенціаловъ у зажимовъ одного индуктирующаго оборота.

Случай арматуры съ обмоткой въ видѣ барабана.

Аналогичное вычисленіе приводитъ почти къ такому же результату и въ томъ случаѣ, если сердечникъ B имѣетъ обмотку, состоящую изъ безконечно тонкихъ оборотовъ, изолированныхъ другъ отъ друга и замкнутыхъ на себя, но расположенныхъ такимъ образомъ, чтобы каждый изъ нихъ обхватывалъ сердечникъ по двумъ противоположнымъ образующимъ и основанія цилиндра по двумъ соотвѣтствующимъ діаметрамъ. Только въ этомъ случаѣ r_2

будетъ обозначать сопротивленіе части обмотки, расположенной по одну сторону оси O и занимающей на средней фибрѣ B дугу, равную одному сантиметру. Такого рода обмотка подобна барабанообразной обмоткѣ Гефнера Алтенека, обороты которой были бы замкнуты на себя.

Легко видѣть, что всѣ точки этихъ оборотовъ, расположенныя на оси O, будутъ имѣть потенціалъ равный нулю. Можно, слѣдовательно, соединить всѣ эти обороты вмѣстѣ въ центрахъ основаній цилиндра посредствомъ, напримѣръ, колецъ, концентричныхъ оси двигателя. Наконецъ, чтобы уменьшить сопротивленіе такой обмотки и упростить устройство арматуры, уничтожаютъ совершенно радіальныя части проволокъ и увеличиваютъ діаметръ указанныхъ выше колецъ. Такая обмотка представляетъ собою родъ арматуры Доливо-Добровольскаго, о которой мы уже упоминали раньше.

Примѣненіе вычисленій къ промышленному двигателю.

Арматура. Возьмемъ какъ примѣръ двухполюсный двигатель съ арматурою изъ полосъ системы Доливо-Добровольскаго и Броуна (рис. 42). Число перемѣнъ тока n извѣстно; въ противномъ случаѣ ему даютъ опредѣленную величину, близкую, напримѣръ, 50 періодамъ въ секунду. Положимъ, что замедленіе при полной нагрузкѣ составляетъ 5°/o. Слѣдовательно:

$$\frac{n - n'}{n} = 0,05.$$

Такимъ образомъ, угловая скорость двигателя n' (число оборотовъ въ секунду) будетъ извѣстна. Въ предварительномъ проектѣ двигателя опредѣляютъ радіусъ арматуры такъ, чтобы ея касательная скорость была около 15 метровъ въ секунду; затѣмъ берутъ ширину l равную радіусу.

Площадь поперечнаго сѣченія всѣхъ полосъ должна быть опредѣлена такой, чтобы *сопротивленіе R всѣхъ этихъ*

полосъ, соединенныхъ параллельно было, равно всему сопротивленію обмотки, вычисленному нами выше, а именно:

$$(1) \qquad R = \frac{r^2}{2\pi\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)}$$

Тогда выбираютъ для каждой полосы сѣченіе и форму такія, чтобы плотность индукціи въ желѣзѣ между двумя полосами была меньше 15000 единицъ C. G. S.

Поперечное сѣченіе каждаго изъ колецъ, соединяющихъ полосы, опредѣлится смотря по силѣ максимальнаго тока, проходящаго по какому-либо обороту. Этотъ токъ имѣетъ своимъ выраженіемъ:

$$(2) \left\{ \begin{aligned} C &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} i_2 \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) d\alpha = \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) J_2 \\ &= \frac{M}{\pi l \rho \beta_m} \end{aligned} \right.$$

Максимальная плотность индукціи β_m въ междужелѣзномъ пространствѣ должна быть взята между 3000 и 6000 единицъ C. G. S., смотря по размѣрамъ двигателя; двигателямъ съ наибольшею работоспособностью должно соотвѣтствовать большее число этихъ единицъ.

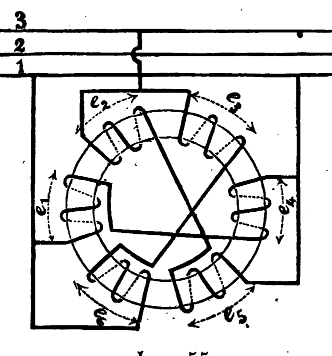
Индукторъ. Толщина индуктирующаго сердечника A опредѣлится по максимальной плотности индукціи $\frac{b_m}{l\,\delta_1}$, которая должна быть меньше 10000 единицъ C. G. S.

Въ дѣйствительности обмотка индуктора состоитъ не изъ безконечнаго числа оборотовъ, питаемыхъ токами, напряженіе которыхъ непрерывно измѣняется въ различныхъ точкахъ окружности; обыкновенно обмотку составляетъ нѣкоторое число катушекъ, изъ которыхъ каждая занимаетъ извѣстную часть кольца; эти катушки подвержены колебаніямъ напряженія, представляющаго для двухъ

какихъ нибудь послѣдовательныхъ катушекъ разность фазъ, равную части періода, которая можетъ быть выражена частнымъ отъ дѣленія единицы на число индуктирующихъ катушекъ, соотвѣтствующее двумъ полосамъ.

Мы уже указали (рис. 47) воспроизводимую ниже схему кольца съ двумя полюсами, снабженнаго тремя парами катушекъ, соединенныхъ послѣдовательно по двѣ и питаемыхъ тремя токами, отодвинутыми на $^1/_3$ періода; три цѣпи имѣютъ соединеніе треугольникомъ.

На рис. 17 изображено кольцо съ 2-мя полюсами и 12 обмотками, питаемыми также тремя токами, имѣющими попарно отодвинутіе фазы на $^1/_3$ періода. Чѣмъ будетъ больше число обмотокъ, тѣмъ болѣе мы приблизимся къ гипотезѣ, допущенной нами при вычисленіи двигателя. Въ случаѣ рис. 55 разность фазъ токовъ въ двухъ сосѣднихъ обмоткахъ равна $^1/_6$ періода, а въ случаѣ рис. 17 она составляетъ лишь $^1/_{12}$ періода.



фиг. 55.

Разсмотримъ индукторъ съ двумя полюсами (рис. 55), возбуждаемый шестью обмотками занимающими каждая $^1/_6$ окружности. Напряженія у зажимовъ этихъ обмотокъ будутъ равны.

$$e_1 = \varepsilon \sin 2\pi nt$$

$$e_2 = \varepsilon \sin\left(2\pi nt + \frac{2\pi}{6}\right)$$

$$e_3 = \varepsilon \sin\left(2\pi nt + \frac{4\pi}{6}\right)$$

$$e_4 = \varepsilon \sin\left(2\pi nt + \frac{6\pi}{6}\right) = -e_1$$

$$e_5 = \varepsilon \sin\left(2\pi nt + \frac{8\pi}{6}\right) = -e_2$$

$$e_6 = \varepsilon \sin\left(2\pi nt + \frac{10\pi}{6}\right) = -e_3$$

Токъ J_1 (уравн. 27, стр. 106):

$$J_1 = \sqrt{A^2\beta_m^2 + B^2\frac{M^2}{\beta_m^2}}$$

представляетъ максимумъ возбужденія на сантиметръ длины средней окружности кольца А. *Это десятая часть амперовъ-оборотовъ на сантиметръ* (при максимальномъ токѣ).

Пусть будетъ:

$\frac{D}{2} = \rho + \alpha + \frac{\delta_1}{2}$, средній радіусъ кольца А.

z число оборотовъ индуктирующей обмотки.
I средняя эффективная тока въ каждой изъ 3-хъ цѣпей.
E » » напряженія » » » »
λ » длина развернутой обмотки.

Имѣемъ:

(1) $$\lambda = \frac{2\pi}{6} \times \frac{D}{2} \text{ сантиметровъ}$$

и

(2) $$z\,I\sqrt{2} = \frac{2\pi}{6}\;\frac{D}{2}\,J_2$$

Напряженіе E у зажимовъ двигателя вообще извѣстно, какъ и въ томъ случаѣ, когда двигатель долженъ быть поставленъ въ отвѣтвленіе общей вторичной канализаціи Отношеніе 36 стр. 107 опредѣляетъ максимальную величину e_m напряженія у зажимовъ какого нибудь индуктирующаго оборота. Будемъ имѣть *приблизительно:*

$$E\sqrt{2} = 2\,z\,e_m$$

Откуда:

$$(3) \qquad z = \frac{1}{2} \frac{E\sqrt{2}}{e_m}$$

E есть эффективное напряженіе у зажимовъ пары обмотокъ діаметрально противоположныхъ.

Слѣдовательно, токъ I будетъ имѣть своею величиною:

$$(4) \qquad I = \frac{\frac{2\pi}{6} \frac{D}{2} J_2}{z\sqrt{2}} = \frac{\pi}{6} \frac{D J_2 e_m}{E}$$

Плотности тока въ индуктирующихъ и индуктируемыхъ обмоткахъ, а также поверхности лучеиспусканія выдѣляющейся теплоты опредѣляются тѣмъ же способомъ, какъ и для динамо постояннаго тока.

ЧЕТВЕРТАЯ ЧАСТЬ.

Трансформаторы многофазныхъ токовъ.

ГЛАВА VII.

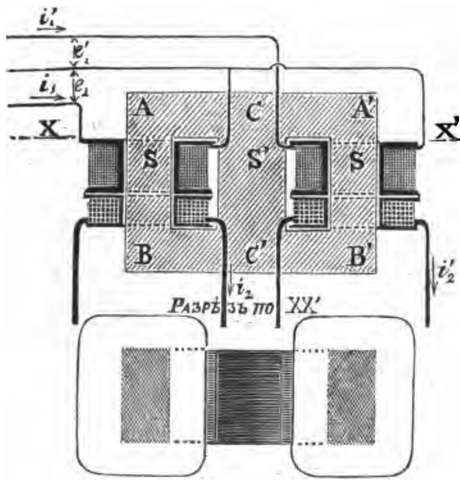
Теорія трансформаторовъ многофазныхъ токовъ.

Трансформаторы многофазныхъ токовъ, помимо многочисленности цѣпей, не представляютъ значительной разницы съ трансформаторами однофазнаго тока. Въ виду этого мы не будемъ останавливаться на вычисленіи этихъ приборовъ, отсылая желающихъ имѣть болѣе полныя свѣдѣнія къ сочиненіямъ, трактующимъ объ обыкновенныхъ трансформаторахъ перемѣннаго тока.

Трансформаторы двухфазнаго тока.

Рис. 56 представляетъ собою схему трансформатора двухфазнаго тока. Магнитная цѣпь такого трансформатора имѣетъ большое сходство съ электрическою цѣпью двухфазнаго тока. Сердечникъ изъ тонкаго листового желѣза состоитъ изъ двухъ полосъ AB, A'B', изъ которыхъ каждая снабжена одной изъ двухъ первичныхъ катушекъ, питаемыхъ двумя токами, отодвинутыми относительно другъ друга на четверть періода, и одною вторичною ка-

тушкою. Третья промежуточная полоса CC′ соединена съ двумя первыми сторонами AA′, BB′; линіи силъ, образуемыя AB, A′B′, замыкаются CC′. Послѣдняя полоса не имѣетъ обмотки. Такимъ образомъ приборъ состоитъ какъ бы изъ двухъ простыхъ трансформаторовъ, питаемыхъ каждый однимъ изъ токовъ, отодвинутыхъ на четверть фазы, и имѣющихъ одну общую часть магнитныхъ цѣпей.



фиг. 56.

Мы допустимъ, что магнитными потерями въ воздухѣ можно пренебречь.

Пусть будетъ:

e_1, e'_1 мгновенныя напряженія у зажимовъ двухъ первичныхъ катушекъ;

E_1 ихъ общая средняя эффективная;

i_1, i'_1 первичные мгновенные токи;

I_1 ихъ средняя эффективная;

e_2, e'_2 вторичныя электровозбудительныя силы;

E_2 ихъ средняя эффективная;

i_2, i'_2 вторичные токи;

I_2 ихъ средняя эффективная;

n число перемѣнъ тока (періодовъ въ секунду);

R_1 сопротивленіе первичной катушки;

R_2 » вторичной »

b, b' мгновенныя индукціи въ вѣтвяхъ AB, A′B′;

B ихъ максимумъ;

S общее сѣченіе вѣтвей AB, A′B′;

S′ сѣченіе промежуточной вѣтви CC′;

N_1 число оборотовъ на первичной катушкѣ;
N_2 » » » вторичной »

Имѣемъ четыре главныя уравненія:

$$(1) \qquad e_1 - R_1 i_1 - N_1 \frac{db}{dt} = 0$$

$$(2) \qquad -e_2 - N_2 \frac{db}{dt} = 0$$

$$(3) \qquad e'_1 - R_1 i'_1 - N_1 \frac{db'}{dt} = 0$$

$$(4) \qquad -e'_2 - N_2 \frac{db'}{dt} = 0$$

Уравненія (1) и (3) показываютъ, что если максимумъ потери напряженія $R_1 i_1$, $R_1 i'_1$ въ каждой первичной обмоткѣ очень малъ сравнительно съ наибольшими первичными напряженіями e_1, e'_1 (въ промышленныхъ трансформаторахъ эта потеря составляетъ отъ одного до половины процента напряженія у первичныхъ зажимовъ), то индукціи b, b' въ вѣтвяхъ AB, A'B' будутъ синусоидальными функціями времени. Слѣдовательно, мы можемъ написать, означивъ чрезъ φ уголъ очень близкій къ $\frac{\pi}{2}$:

$$(5) \qquad b = B \sin (2 \pi nt + \varphi)$$

$$(6) \qquad b' = - B \cos (2 \pi nt + \varphi)$$

Поэтому, изъ уравненій (2) и (4) слѣдуетъ, что электровозбудительныя силы e_2, e'_2, порождаемыя во вторичныхъ катушкахъ, будутъ также синусоидальными функціями времени.

Вся индукція въ промежуточной полосѣ CC' въ моментъ t будетъ:

$$-b - b' = - B [\sin (2 \pi nt + \varphi) - \cos (2 \pi nt + \varphi)]$$

$$(7) \qquad = - B \sqrt{2} \sin \left(2 \pi nt + \varphi - \frac{\pi}{4}\right)$$

Слѣдовательно, фаза этой индукціи въ CC′ запаздываетъ на $^1/_8$ періода относительно фазы b и находится впереди на $^1/_8$ періода относительно фазы b'.

Ея абсолютный максимумъ равенъ $B\sqrt{2}$, т. е. наибольшей величинѣ всей индукціи въ каждой изъ полосъ AB, A′B′, умноженной на 1,41. Если, слѣдовательно, хотятъ имѣть одинаковое напряженіе индукціи въ трехъ полосахъ, то поперечное сѣченіе S′, промежуточной полосы должно быть:

$$S' = S\sqrt{2} \tag{8}$$

Связи AC, BC′, A′C, B′C′ подвержены индукціямъ b и b'; ихъ сѣченіе должно быть, слѣдовательно, одинаково съ сѣченіемъ полосы AB или A′B′.

Уравненія (1) и (2) могутъ быть написаны такъ:

$$e_1 = R_1 i_1 + N_1 \frac{db}{dt}$$

$$e_2 = - N_2 \frac{db}{dt}$$

Слѣдовательно, если, какъ мы уже сказали, максимумъ $R_1 i_1$ очень малъ, сравнительно съ максимумомъ e_1, то фазы напряженій первичнаго e_1 и вторичнаго e_2, соотвѣтствующія одной и той же полосѣ AB, будутъ почти противоположны, т. е. фаза электровозбудительной силы вторичной катушки будетъ запаздывать на полъ періода относительно напряженія у зажимовъ первичной катушки.

Изъ уравненій (1) и (2) получаемъ еще:

$$e_1 = R_1 i_1 - \frac{N_1}{N_2} e_2 \tag{9}$$

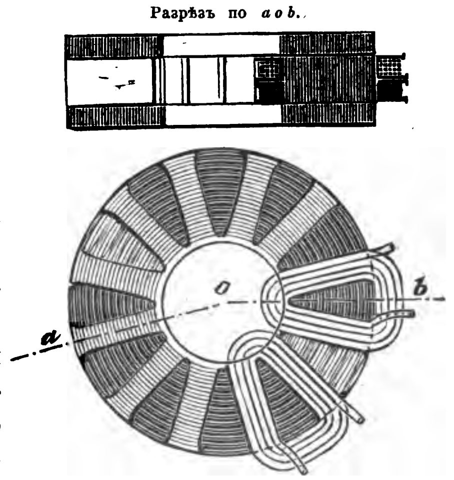
Коэффиціентъ $\frac{N_1}{N_2}$ есть то, что называютъ отдачей разсматриваемаго трансформатора; это есть частное отъ дѣленія первичнаго напряженія на вторичную электровоз-

будительную силу, когда трансформаторъ дѣйствуетъ при разомкнутой вторичной цѣпи.

Сдѣлавъ эти замѣчанія, вычисленіе трансформатора двухфазнаго тока данной работоспособности P приводится къ вычисленію двухъ трансформаторовъ однофазнаго тока, имѣющихъ каждый работоспособность $\frac{P}{2}$ и долженствующихъ преобразовать токъ даннаго эффективнаго напряженія E_1 и числа перемѣнъ n въ токъ также даннаго эффективнаго напряженія E_2.

Трансформаторъ двухфазнаго тока Шукерта.

Магнитный сердечникъ этого трансформатора, изображенный на рис. 57, состоитъ изъ двухъ частей. Одна изъ нихъ представляетъ собою тонкую ленту изъ листового желѣза, свернутую въ спираль въ видѣ плоскаго кольца, въ которомъ сдѣланы выемки по направленію радіусовъ, опредѣляющія на одной изъ сторонъ диска рядъ зубцовъ, параллельныхъ оси. Эти зубцы черезъ два снабжены одною первичною и одною вторичною катушками, расположенными одна надъ другою.

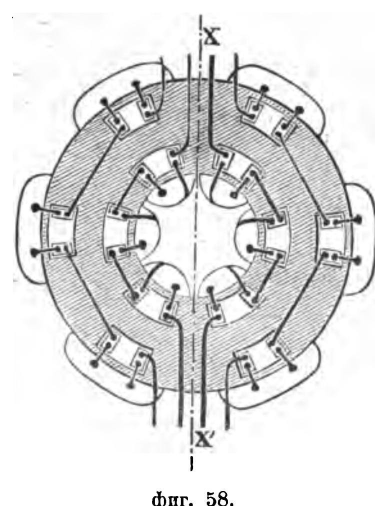


фиг. 57.

Первичныя катушки. находящіяся влѣво отъ діаметра XX^1 (рис. 58) соединены послѣдовательно и составляютъ одну изъ двухъ первичныхъ цѣпей. Соотвѣтствующія вторичныя катушки также соединены послѣдовательно и составляютъ вторичную цѣпь. Катушки, расположенныя

вправо отъ діаметра XX[1], соединены такимъ же образомъ и составляютъ вторую первичную и вторую вторичную цѣпи.

Вторая часть сердечника представляетъ собою сплошной дискъ, составленный также изъ тонкой желѣзной ленты, свернутой въ спираль. Этотъ дискъ укрѣпленъ на первомъ кольцѣ посредствомъ болтовъ.



фиг. 58.

Линіи силъ, образуемыя какой нибудь отдѣльной обмоткой, замыкаются посредствомъ крышки и двухъ зубцовъ, расположенныхъ съ одной и съ другой стороны.

Соединенія двухъ рядовъ первичныхъ катушекъ расположены на внѣшней сторонѣ крышки, а вторичныхъ катушекъ на внутренней сторонѣ этого кольца.

Легко видѣть, что всѣ зубцы сердечника должны имѣть одинаковое сѣченіе и что поперечное сѣченіе крышки, а также желѣза, соединяющаго два зубца, должно быть каждое равно половинѣ нормальнаго сѣченія зубца.

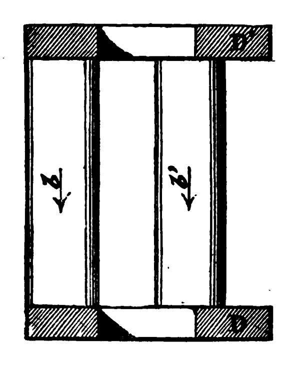
Въ концѣ концовъ такой трансформаторъ представляетъ собою два почти независимыхъ трансформатора однофазнаго тока, соединенныхъ вмѣстѣ.

При установкѣ фирмою Шукертъ передачи энергіи на Франкфуртской выставкѣ 1891 года такіе трансформаторы дѣйствовали на станціи отправленія для подъема напряженія и на станціи назначенія для уменьшенія его.

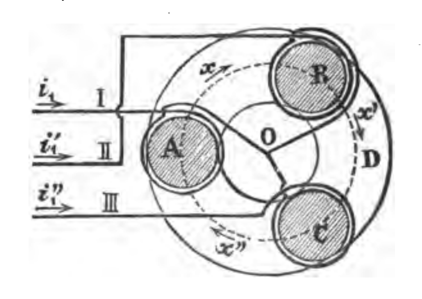
Трансформаторы трехфазныхъ токовъ.

Разсмотримъ желѣзный остовъ (рис. 59 и 60), состоящій изъ трехъ параллельныхъ сердечниковъ A, B, C, магнетически соединенныхъ своими концами посредствомъ двухъ желѣзныхъ вѣнцовъ D, D′.

Бруски A, B, C представляютъ собою пучки желѣзныкъ проволокъ или полосъ, а кольца D, D′ состоятъ изъ желѣзной ленты, свернутой въ спираль.



фиг. 59.



фиг. 60.

Каждый изъ брусковъ имѣетъ одну первичную обмотку и одну вторичную. Рис. 60 представляетъ схему первичной обмотки при соединеніи звѣздочкой. Вторичная обмотка расположена точно также. Три первичныя напряженія представляютъ попарно разность фазъ равную $1/3$ періода.

Пусть будетъ:

e_1, e'_1, e''_1 напряженія у зажимовъ первичныхъ обмотокъ брусковъ A, B, C;

E_1 ихъ средняя эффективная;

i_1, i'_1, i''_1 мгновенные первичные токи;

I_1 ихъ средняя эффективная;

n число перемѣнъ тока;

R_1 сопротивленіе одной первичной катушки;

e_2, e'_2, e''_2 вторичныя электровозбудительныя силы;

E_2 ихъ средняя эффективная;

i_2, i'_2, i''_2 вторичные токи;

N_1 число оборотовъ на первичной катушкѣ;

N_2 число оборотовъ на вторичной катушкѣ;

S сѣченіе каждаго сердечника A, B, C;

σ поперечное сѣченіе вѣнцовъ D, D';

b, b', b'' индукціи въ сердечникахъ A, B, C въ моментъ t;

B ихъ максимумъ;

x, x', x'' индукціи въ частяхъ вѣнцовъ, расположенныхъ между брусками A, B, C;

X ихъ максимумъ;

Вслѣдствіе сдѣланныхъ предположеній, будемъ имѣть:

$$(1) \qquad e_1 = E\sqrt{2}\sin 2\pi n t$$

$$(2) \qquad e'_1 = E\sqrt{2}\sin\left[2\pi n t - \frac{2\pi}{3}\right]$$

$$(3) \qquad e''_1 - E\sqrt{2}\sin\left[2\pi n t - \frac{4\pi}{3}\right]$$

Три первичныхъ обмотки даютъ уравненія:

$$(4) \qquad e_1 - R_1 i_1 - N_1 \frac{d\,b}{d\,t} = 0$$

$$(5) \qquad e'_1 - R_1 i'_1 - N_1 \frac{d\,b'}{d\,t} = 0$$

$$(6) \qquad e''_1 - R_1 i''_1 - N_1 \frac{d\,b''}{d\,t} = 0$$

Разсматривая три вторичныхъ цѣпи, будемъ имѣть:

$$(7) \qquad -e_2 - N_2 \frac{d\,b}{d\,t} = 0$$

(8) $$-e'_2 - N_2 \frac{db'}{dt} = 0$$

(9) $$-e''_2 - N_2 \frac{db''}{dt} = 0$$

Уравненія 1, 2, 3 даютъ, какъ это мы уже видѣли въ первой части этого сочиненія:

(10) $$e_1 + e'_1 + e''_1 = 0$$

Если мы допустимъ, что магнитными потерями въ воздухѣ можно пренебречь, то будемъ имѣть:

(11) $$b + b' + b'' = 0$$

Откуда:

(12) $$db + db' + db'' = 0$$

Въ то же время, въ силу равенствъ 4, 5, 6, 10 и 12, имѣемъ:

(13) $$i_1 + i'_1 + i''_1 = 0$$

Магнитная цѣпь трансформатора трехфазнаго тока представляетъ, такимъ образомъ, большое сходство съ электрическою цѣпью трехфазнаго тока. Линіи силъ, образуемыя каждой изъ отдѣльныхъ обмотокъ одного бруска, замыкаются посредствомъ двухъ другихъ брусковъ, какъ это показываетъ равенство 11.

Изъ уравненій 4, 5, 6 слѣдуетъ, что если максимальная величина потерь напряженія $R_1 i_1$, $R_1 i'_1$, $R_1 i''_1$ въ первичныхъ катушкахъ очень мала сравнительно съ максимальной величиной напряженій e_1, e'_1, e''_1, то функціи $\frac{db}{dt}$, $\frac{db'}{dt}$, $\frac{db''}{dt}$ будутъ замѣтно синусоидальны, каковъ бы ни былъ видъ первичныхъ токовъ i_1, i'_1, i''_1. Индукціи b, b', b'' будутъ, слѣдовательно, также синусоидальными функціями.

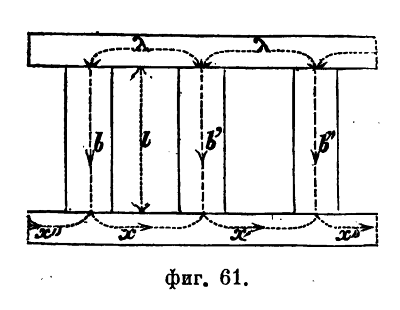
Можно еще видѣть, что фазы вторичныхъ напряженій замѣтно противоположны соотвѣтствующимъ фазамъ первичныхъ напряженій.

Мы можемъ, слѣдовательно, написать, обозначивъ чрезъ φ уголъ очень близкій къ $\frac{\pi}{2}$:

$$(14) \qquad b = B \sin (2 \pi n t + \varphi)$$

$$(15) \qquad b' = B \sin \left[2 \pi n t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right]$$

$$(16) \qquad b'' = B \sin \left[2 \pi n t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right]$$



фиг. 61.

Разсмотримъ теперь индукціи x, x', x'' въ каждомъ изъ вѣнцовъ. На рис. 61 изображена развертка остова по среднему цилиндру. Очевидно имѣемъ:

$$(17) \qquad x - x'' = b$$

$$(18) \qquad x' - x = b'$$

$$(19) \qquad x'' - x' = b''$$

$$(20) \qquad 2 \frac{\lambda}{\mu \sigma} x = 4 \pi N_1 (i_1 - i'_1) + \frac{l}{\mu S} (b' - b)$$

$$(21) \qquad 2 \frac{\lambda}{\mu \sigma} x = 4 \pi N_1 (i'_1 - i''_1) + \frac{l}{\mu S} (b'' - b')$$

$$(22) \qquad 2 \frac{\lambda}{\mu \sigma} x'' = 4 \pi N_1 (i''_1 - i_1) + \frac{l}{\mu S} (b - b'')$$

Сложивши почленно эти три уравненія, получимъ.

$$(23) \qquad x + x' + x'' = 0$$

Изъ 17, 18 и 23 получаемъ:

$$(24) \qquad x = \frac{1}{3} (b - b')$$

или

$$x = \frac{B}{3} \left[\sin (2 \pi n t + \varphi) - \sin \left(2 \pi n t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right)\right]$$

(25) $$= \frac{B\sqrt{3}}{3} \sin\left[2\pi n t + \varphi + \frac{\pi}{6}\right]$$

Абсолютный максимумъ индукціи x будетъ слѣдовательно:

(26) $$X = \frac{B\sqrt{3}}{3} = 0{,}577\ B$$

Если, слѣдовательно, хотятъ, чтобы плотность максимальной индукціи была одинакова въ вѣнцахъ и въ сердечникахъ, снабженныхъ обмотками, то необходимо взять:

(27) $$\sigma = 0{,}577\ S$$

Установивши это, вычисленіе трансформатора трехфазнаго тока работоспособности P представляетъ мало разницы съ вычисленіемъ трехъ одинаковыхъ трансформаторовъ однофазнаго тока работоспособности $\frac{P}{3}$, питаемыхъ каждый однимъ изъ трехъ первичныхъ токовъ и дающихъ одинъ изъ трехъ вторичныхъ токовъ.

На рис. 59 и 60 указанъ общій видъ магнитнаго сердечника трансформаторовъ трехфазнаго тока, употреблявшихся при передачѣ энергіи отъ Лауффена до Франкфурта въ 1891 году.

Трансформаторъ, который былъ установленъ въ Лауффенѣ для увеличенія напряженія, даваемаго генераторомъ, имѣлъ работоспособность въ 200 килоуаттовъ. Нормальное напряженіе между концами каждой первичной катушки и центромъ звѣздочки было равно 50 вольтамъ. Вторичная обмотка или обмотка высокаго напряженія имѣла также соединеніе звѣздочкой.

Отношеніе чиселъ оборотовъ проволоки вторичной и первичной обмотокъ было равно 160. Напряженіе между вторичнымъ зажимомъ и центромъ звѣздочки было, слѣдовательно:

$$50^v \times 160 = 8000 \text{ вольтовъ}$$



и напряженіе у двухъ вторичныхъ зажимовъ:

$$8000^{v} \times 1,73 = 13840 \text{ вольтовъ.}$$

Число перемѣнъ тока равнялось 40 періодамъ въ секунду.

Обѣ обмотки, первичная и вторичная, были расположены концентрически. Первичная обмотка на сердечникѣ была изъ толстой проволоки; вторичная обмотка изъ тонкой проволоки покрывала первую. Эти обмотки были изолированы другъ отъ друга фарфоровой муфтой. Кромѣ того, вторичная обмотка была раздѣлена на большое число секцій посредствомъ изолирующихъ діафрагмъ, перпендикулярныхъ оси.

Трансформаторъ послѣ тщательной высушки былъ заключенъ въ футляръ изъ листового желѣза, который затѣмъ наполнили смолистымъ масломъ.

ГЛАВА VIII.

Двойное преобразованіе. Употребленіе трансформаторовъ, увеличивающихъ напряженіе.

Мы уже указали въ предшествующей главѣ, что при употребленіи для полученія многофазныхъ токовъ обыкновенной динамо постояннаго тока, снабженной кольцами, представляется необходимымъ пользоваться трансформаторомъ для увеличенія напряженія генератора, какъ только напряженіе тока линіи должно превысить нѣсколько сотъ вольтовъ.

Динамо Броуна, употреблявшаяся при передачѣ энергіи отъ Лауффена до Франкфурта, относительно которой мы уже сдѣлали нѣкоторыя указанія во второй части этого труда, также не можетъ быть употреблена для непосредственнаго полученія высокихъ напряженій. Устрой-

ство ея арматуры может быть, очевидно, только тогда экономичнымъ, когда ея обмотка состоитъ изъ полосъ, но въ этомъ случаѣ получаются токи большой силы и слабаго напряженія. Если, наоборотъ, обмотка арматуры состояла бы изъ проволокъ, соединенныхъ послѣдовательно, то самое обматываніе проволоки представило бы затрудненіе, а также изоляція и форма проволокъ значительно уменьшили бы объемъ металла, могущаго быть полезнымъ. Такимъ образомъ, работоспособность динамо при томъ же ея остовѣ была бы уменьшена, а слѣдовательно и отдача машины; стоимость же единицы работоспособности, наоборотъ, увеличилась бы. Кромѣ того, при такомъ устройствѣ арматуры трудно получить полное изолированіе обмотки арматуры отъ сердечника. И въ этомъ случаѣ, слѣдовательно, необходимо присоединить къ генератору трансформаторъ, увеличивающій напряженіе.

Обыкновенныя динамо перемѣннаго тока довольно хорошо примѣняются для непосредственнаго полученія высокихъ напряженій. Индуктируемыя катушки, соединенныя послѣдовательно, могутъ быть установлены отдѣльно на подставкахъ, тщательно изолированныхъ отъ другихъ частей машины. Такимъ образомъ, въ случаѣ сообщенія съ металлической массою, наибольшая разность потенціала, которая могла бы существовать между какой нибудь точкой обмотки и металлической массою, была бы наибольшее равна напряженію, производимому этой самой обмоткой.

Посредствомъ очень сильныхъ альтернаторовъ, когда возможно придать большое значеніе изоляціи, не уменьшая въ то же время чувствительно работоспособности машины, можно получить очень высокія напряженія, не прибѣгая къ трансформаторамъ. Такъ динамо Ферранти въ 1500 лошадиныхъ силъ, установленныя на станціи Deptford возлѣ Лондона, даютъ непосредственно эффективное напряженіе въ 10000 вольтовъ при 100 амперахъ, 48 индуктируемыхъ катушекъ установлены парами на подстав-

кахъ, прикрѣпленныхъ къ бронзовой ступицѣ арматуры посредствомъ эбонитныхъ изоляторовъ и задѣланныхъ сѣрою. Кромѣ того, во избѣжаніе боковыхъ разрядовъ полюсныя поверхности индуктора покрываются эбонитомъ.

Установка динамо меньшей работоспособности для полученія столь высокаго напряженія была бы непрактичной вслѣдствіе того значенія, которое пріобрѣла бы изоляція относительно мѣди арматуры, а также вслѣдствіе величины междужелѣзнаго пространства.

На электрической станціи Deptford'а установлено еще два альтернатора Ферранти, дающихъ каждый 200 амперовъ и 2400 вольтовъ; баттарея трансформаторовъ въ 150 электрическихъ лошадей подымаетъ напряженіе до 10000 вольтовъ. На сколько намъ извѣстно, это одно изъ первыхъ промышленныхъ примѣненій трансформаторовъ для предварительнаго подъема напряженія.

Употребленіе генератора низкаго напряженія съ трансформаторомъ для увеличенія послѣдняго представляетъ большую безопасность для служащихъ, которымъ порученъ надзоръ за машинами и управленіе приборами, находящимися на распредѣлительной доскѣ.

Къ такой динамо можно прикасаться безопасно во время ея дѣйствія; что же касается трансформатора, то такъ какъ онъ не имѣетъ ни одной подвижной части, то надзоръ за нимъ почти совершенно не нуженъ и онъ можетъ быть помѣщенъ въ футляръ такимъ образомъ, чтобы всякое соприкосновеніе съ нимъ сдѣлалось невозможнымъ. Наконецъ, не считая электрометровъ, включеніе которыхъ въ цѣпь высокаго напряженія можетъ быть полезнымъ, но которые слѣдуетъ помѣщать такимъ образомъ, чтобы было невозможнымъ соприкосновеніе съ тѣми ихъ частями, которыя соединены съ токомъ, всѣ остальные приборы, какъ то: вольтометры, амперометры, прерыватели и реостаты помѣщаются на распредѣлительной доскѣ и имѣютъ соединеніе только съ токомъ генератора и съ токомъ, возбуждающимъ послѣдній. Однако, слѣдуетъ избѣгать

употребленія генераторовъ слишкомъ низкаго напряженія, чтобы не имѣть дѣла съ токами громадной силы, которые требуютъ черезъ чуръ уже значительныхъ размѣровъ для прерывателей и для соединеній динамо съ трансформаторомъ и съ приборами распредѣлительной доски.

Какъ на недостатки этого способа полученія токовъ высокаго напряженія указывали:

1. На увеличеніе стоимости установки, вслѣдствіе необходимости пріобрѣтать трансформаторъ для подъема напряженія;

2. На уменьшеніе окончательной отдачи (отъ оси динамо до зажимовъ у начала линіи).

При употребленіи динамо нѣкоторыхъ системъ значительная часть дополнительнаго расхода на пріобрѣтеніе трансформатора покрывается экономіей отъ установки генератора низкаго напряженія.

На второе замѣчаніе мы отвѣтимъ, что возможно построить, какъ это сдѣлалъ Броунъ, динамо низкаго напряженія, отдача которой была бы значительнѣе динамо высокаго напряженія, и этимъ покрыть расходъ на пріобрѣтеніе трансформатора.

Не имѣя точныхъ данныхъ относительно отдачи генераторовъ, производящихъ непосредственно многофазный токъ высокаго напряженія, мы сравнимъ, въ подтвержденіе высказаннаго нами, обыкновенный генераторъ системы Lotin, дѣйствующій на одной значительной электрической станціи, съ трехфазной динамо Броуна въ 300 лошадиныхъ силъ.

Нормальная работоспособность альтернатора однофазнаго тока	400 килоуаттовъ
Нормальный расходъ	133 ампера
Эффективное напряженіе	3000 вольтовъ
Число періодовъ въ секунду	40
Потеря работоспособности въ индуктируемой обмоткѣ	3%

Работоспособность, поглощаемая возбужденіемъ. 3,5%

Потеря вслѣдствіе токовъ Фуко, гистерезиса, вентиляціи и т. п. 8%

Вся потеря работоспособности. 14,5%

Промышленная гарантированная отдача. 85,5%

Обратимся теперь къ таблицѣ, которую мы приводимъ ниже и въ которой отмѣчены результаты, полученные коммисіей Франкфуртской выставки, производившей опыты надъ передачей энергіи посредствомъ трехфазнаго тока, установленнаго мастерскими Эрликона и Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

Динамо была построена для поглощенія 300 лош. силъ, число перемѣнъ тока равнялось 40.

Какъ видно изъ таблицы, наибольшая работоспособность, которая была доставлена генератору при этихъ опытахъ, равнялась, считая и возбужденіе, 197,4 лош. силъ. Свободная работоспособность у зажимовъ динамо была равна 184,8 лош. силамъ, что соотвѣтствуетъ отдачѣ генератора въ 93,5%. Слѣдовательно, трансформаторъ получалъ у своихъ первичныхъ зажимовъ 184,8 лош. силъ, а отдавалъ у вторичныхъ зажимовъ (высокаго напряженія) 177,6 лош. силъ. Такимъ образомъ отдача трансформатора при этихъ условіяхъ составляла 96,1%. Слѣдовательно, окончательная отдача отъ оси динамо до вторичныхъ зажимовъ трансформатора равнялась:

$$\frac{177,6}{197,4} = 0,935 \times 0,961 = \text{почти } 0,90.$$

Судя по этимъ опытамъ, не смотря на то, что нагрузка генератора и трансформатора не составляла и $^2/_3$ ихъ нормальной нагрузки, окончательная отдача всей группы была равна почти 90%.

Мы видимъ, такимъ образомъ, по этому частному примѣру, что не смотря на неблагопріятныя условія: мень-

шую нормальную работоспособность и дѣйствіе съ неполной нагрузкой, окончательная отдача въ приведенномъ случаѣ все же превышаетъ отдачу генератора высокаго напряженія.

Если мы допустимъ отдачу въ 96%, объявленную для динамо Броуна при полной нагрузкѣ и отдачу въ 97% для трансформатора въ 200 килоуаттовъ при полной нагрузкѣ, то окончательная отдача будетъ равна:

$$0,96 \times 0,97 = \text{почти } 0,93.$$

Употребленіе жидкаго изолятора.

Волокнистыя вещества, какъ то хлопчатая бумага и холстъ, пропитанныя гуммилакомъ, могутъ служить очень хорошими изоляторами, когда они только что приготовлены, но отъ продолжительнаго дѣйствія воздуха они становятся гигрометрическими и подвергаются порчѣ.

Вообще, не слѣдуетъ полагаться на воздухъ, какъ на тѣло діэлектрическое; влажность дѣлаетъ его хорошимъ проводникомъ. Если двѣ металлическія поверхности съ различными потенціалами раздѣлены слоемъ воздуха, то между ними является большое стремленіе къ разряду посредствомъ истеченія электричества. Если, кромѣ того, изолированіе произведено твердымъ діэлектрическимъ тѣломъ, напримѣръ эбонитомъ, поверхность котораго способна повреждаться отъ дѣйствія воздуха и свѣта, то можетъ случиться, при очень высокихъ перемѣнныхъ напряженіяхъ, что временное увеличеніе напряженія вызоветъ искру, которая затѣмъ преобразуется въ дугу.

Преимущества жидкаго изолятора состоятъ въ томъ, что въ него можетъ быть совершенно погруженъ трансформаторъ, чѣмъ исключается всякая возможность соприкосновенія съ воздухомъ и влажностью, а также разряды посредствомъ истеченія электричества приводятся къ нулю. Если же, однако, и въ этомъ случаѣ появилась бы

искра, то изоляція возстановилась бы немедленно по ея исчезновеніи, если, конечно, эта искра не была бы на столько сильна, чтобы разложить жидкій изоляторъ и образовать себѣ изъ углерода какъ бы мостъ проводникъ между двумя металлическими поверхностями.

Въ качествѣ жидкаго изолятора употребляютъ различные сорта маслъ, которыя не должны заключать и слѣда воды или кислоты. Масло для изоляціи трансформаторовъ должно быть плотнѣе воды, тогда, въ случаѣ проникновенія въ футляръ влажности, вода соберется и останется на поверхности изолятора. Тяжелое смолистое масло, приготовленное надлежащимъ образомъ, вполнѣ удовлетворяетъ этимъ условіямъ.

Предварительно тщательно высушиваютъ трансформаторъ въ пескѣ, а затѣмъ помѣщаютъ его въ металлическій или каменный футляръ, который наполняютъ кипящимъ масломъ; масло это вновь подвергаютъ кипѣнію для того, чтобы удалить послѣдніе слѣды влажности и пузырки воздуха, послѣ чего закрываютъ футляръ.

Первое примѣненіе масла въ качествѣ изолятора было сдѣлано въ 1854 г. въ Парижѣ любителемъ механикомъ Жаномъ; сначала онъ высушивалъ индуктивную катушку въ теплѣ, а затѣмъ заканчивалъ зто высушиваніе въ пустотѣ, послѣ чего погружалъ катушку въ терпентинное масло.

Почти одновременно Поггендорфъ предложилъ употреблять также масло для изолированія индуктивныхъ катушекъ.

Въ послѣдніе годы употребленіе масла для изоляціи было усердно рекомендовано Давидомъ Броокомъ, Жонсономъ и Филиписомъ, Томсономъ-Хустономъ, Броуномъ и др. Трансформаторы Ферранти въ 150 лош. силъ и 10000 вольтовъ погружаются въ масло; на станціи Deptford ящики соединенія фидеровъ также наполнены масломъ.

Преобразованіе многофазныхъ токовъ въ постоянные.

Разсмотримъ кольцеобразный неподвижный индукторъ А, снабженный системой катушекъ, питаемыхъ двухфазнымъ или трехфазнымъ токомъ. Катушки, по которымъ проходитъ многофазный токъ, могутъ быть сгруппированы, согласно одной изъ указанныхъ нами выше схемъ.

Обмотка индуктора можетъ быть также непрерывною, какъ это мы уже замѣтили (рис. 36 стр. 74).

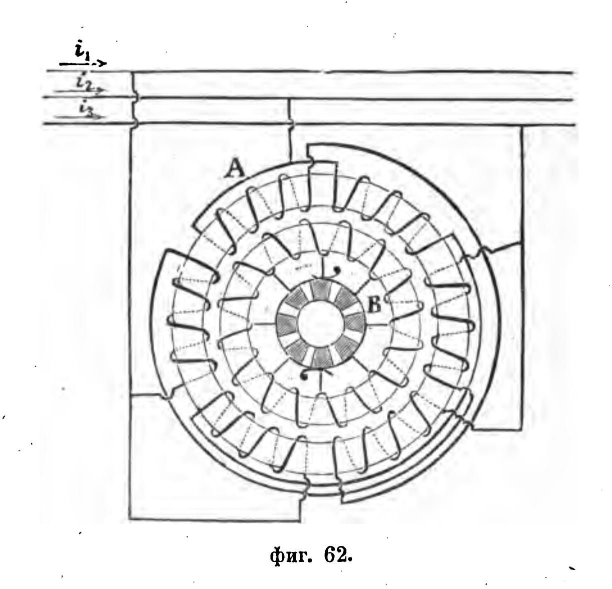
Если располагаютъ тремя токами, представляющими попарно разность фазъ въ $^1/_3$ періода, то можно принять способъ обмотки предложенный Доливо-Добровольскимъ, позволяющій получить шесть токовъ возбудителей, отодвинутыхъ попарно на $^1/_{12}$ періода.

Помѣстимъ концентрически этому индуктору второе кольцо, также неподвижное, системы Грамма напримѣръ, снабженное своимъ обыкновеннымъ коллекторомъ.

Вращающееся поле, производимое многофазнымъ токомъ, породитъ въ неподвижномъ кольцѣ В электровозбудительную силу, равную той, которая была бы произведена, если бы поле было неподвижно, а кольцо В вращалось въ обратную сторону со скоростью вращенія поля. Слѣдовательно, если имѣть двѣ щетки, соприкасающіяся съ коллекторомъ по нейтральной линіи, т. е. по діаметру, приблизительно перпендикулярному направленію поля въ данный моментъ, то можно собрать на этихъ щеткахъ постоянный токъ.

Такъ какъ поле, а слѣдовательно также и нейтральная линія перемѣщаются, то щетки должны слѣдовать за движеніемъ вращающагося поля. Для этого достаточно установить эти щетки на коромыслѣ, прикрѣпленномъ къ стержню изъ мягкаго желѣза или къ электромагниту, какъ это мы указали (стр. 71, рис. 34). подвижному вокругъ общей оси колецъ А и В и составляющему арматуру индуктора А. Такимъ образомъ щетки будутъ приводиться въ движеніе синхроничное вращенію поля.

Въ виду того, что щетки подвижны, онѣ должны быть соединены съ двумя кольцами, съ которыхъ уже и будетъ собираться токъ двумя другими неподвижными щетками.



фиг. 62.

Мы уже видѣли, что обыкновенная динамо постояннаго тока, снабженная кольцами, можетъ служить трансфоматоромъ многофазнаго тока въ постоянный.

Согласно высказанному нами на стр. 56, напряженіе постояннаго тока и эффективное напряженіе двухфазнаго тока будутъ находиться, не принимая во вниманіе воздѣйствій арматуры, въ отношеніи 1,4 къ 1.

Гутенъ и Лебланъ предложили для преобразованія многофазныхъ токовъ въ постоянный токъ различныя приспособленія, описаніе которыхъ можно найти въ спеціальныхъ періодическихъ журналахъ.

Трансформаторъ многофазнаго тока въ постоянный Ламейера.

Этотъ приборъ есть измѣненный трансформаторъ постояннаго тока того же Ламейера. Послѣдній трансформаторъ представляетъ собою динамо постояннаго тока съ четырьмя индуктирующими полюсами и съ зубчатымъ барабаномъ, который имѣетъ двѣ обмотки, соединенныхъ каждая съ однимъ изъ двухъ коллекторовъ, расположенныхъ по одну и другую сторону арматуры.

Первичныя обмотки изъ тонкой проволоки помѣщаются на днѣ ложбинокъ, вторичныя же обмотки, производящія токъ низкаго напряженія, накладываются на первыя и занимаютъ верхнюю часть ложбинокъ.

Весьма важно сдѣлать невозможнымъ вторженіе тока высокаго напряженія въ цѣпь низкаго напряженія, что могло бы произойти какъ вслѣдствіе соприкосновенія двухъ обмотокъ, такъ и вслѣдствіе появленія между ними искры. Во избѣжаніе этого помѣщаютъ въ каждую ложбинку между двумя обмотками, первичной и вторичной, мѣдную изолированную съ обѣихъ своихъ сторонъ пластинку, выступающую внѣ ложбинки.

Кромѣ того, на одной изъ сторонъ арматуры вставляютъ между двумя обмотками двойную мѣдную ткань, соединенную электрически съ мѣдными пластинками ложбинокъ; на другой сторонѣ арматуры также помѣщаютъ между двумя обмотками подобную же металлическую ткань, но уже изолированную отъ мѣдныхъ пластинокъ. Эти двѣ части защищающаго покрова, состоящія одна изъ металлической ткани и мѣдныхъ пластинокъ, другая же только изъ металлической ткани соединены каждая отдѣльно съ остовомъ машины, а слѣдовательно и съ землею. Изоляція между двумя этими частями, очевидно, имѣетъ цѣлью воспрепятствовать появленію въ мѣдныхъ пластинкахъ вредныхъ токовъ. Такимъ образомъ вторичная цѣпь оказывается вполнѣ защищенной отъ тока высокаго напряженія.

Трансформаторъ многофазнаго тока въ постоянный Ламейера отличается отъ описаннаго нами прибора въ своихъ главныхъ чертахъ только тѣмъ, что коллекторъ первичной обмотки замѣненъ въ немъ кольцами (въ числѣ трехъ въ случаѣ трехфазнаго тока), изолированными и соединенными съ обмоткой изъ тонкой проволоки.

Фирма Ламейера производитъ непосредственно трехфазный токъ высокаго напряженія генераторами съ отдѣльнымъ возбужденіемъ. Этотъ токъ проводится посредствомъ трехъ проволокъ до мѣста пользованія, гдѣ онъ проходитъ непосредственно по первичной обмоткѣ трансформаторовъ.

Электромагниты трансформатора, сердечникъ арматуры и первичныя обмотки составляютъ синхроничный двигатель трехфазнаго тока, приходящій въ движеніе автоматически; вторичная обмотка и электромагниты разъ возбужденные представляютъ собою генераторъ постояннаго тока низкаго напряженія. Этотъ токъ питаетъ вторичную канализацію, напримѣръ въ 110 вольтовъ, и служитъ для заряженія аккумуляторовъ.

Если распредѣляемая энергія должна служить не только для освѣщенія, но еще и двигательною силою, то небольшіе двигатели могутъ быть питаемы постояннымъ токомъ, тогда какъ большіе двигатели помѣщаются въ отвѣтвленія непосредственно отъ канализаціи многофазнаго тока высокаго напряженія. Такимъ образомъ получается экономія въ установкѣ вторичной канализаціи и вмѣстѣ съ тѣмъ увеличивается окончательная отдача.

Слѣдовательно, въ подобной системѣ электрическая энергія производится и передается въ видѣ многофазнаго тока высокаго напряженія, распредѣляется же она и аккумулируется въ видѣ постояннаго тока низкаго напряженія за исключеніемъ, какъ это мы только что видѣли, случаевъ употребленія большихъ двигателей.

Преимущество этой системы передъ системой, въ которой энергія производится и передается въ видѣ посто-

яннаго тока высокаго напряженія, преобразуемаго затѣмъ въ постоянный токъ низкаго напряженія, заключается, очевидно, въ томъ, что въ ней совершенно устранены коллекторы тока высокаго напряженія какъ въ генераторахъ, такъ и въ трансформаторахъ.

Такъ какъ при этой системѣ не употребляются трансформаторы ни для увеличенія, ни для уменьшенія напряженія многофазнаго тока, то число перемѣнъ тока не имѣетъ того значенія, которое оно имѣло бы въ противномъ случаѣ.

ПЯТАЯ ЧАСТЬ.

Устройство канализацій и описаніе нѣкоторыхъ установокъ.

ГЛАВА IX.

Устройство канализацій.

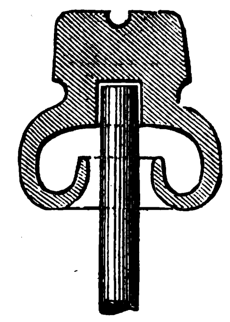
До сихъ поръ для передачи токовъ высокаго напряженія проводились почти исключительно только воздушныя линіи. Упомянемъ, однако, о подземныхъ кабеляхъ Ферранти спеціальнаго изготовленія, употребляющихся для передачи обыкновеннаго переменнаго тока въ 10000 вольтовъ отъ станціи Deptford'а до промежуточныхъ станцій Grosvenor'а, Trafalgar'а, Pimlico и Blackfriars'а.

Легкія линіи проводятся обыкновенно на деревянныхъ столбахъ, разставленныхъ на разстояніи приблизительно отъ 40 до 60 метровъ одинъ отъ другого. Для линій тяжелыхъ или имѣющихъ большое значеніе употребляются металлическіе столбы. Когда линія высокаго напряженія пересѣкаетъ дорогу, то хорошо расположить подъ этой линіей сѣтку, которая, въ случаѣ разрыва проволоки, воспрепятствуетъ ея паденію.

Обыкновенные фарфоровые изоляторы, имѣющіе форму двойного колокола, представляютъ большое сопротивленіе для электричества, когда они совершенно сухи, но разъ

они помѣщены во влажной атмосферѣ, то поверхность ихъ дѣлается хорошимъ проводникомъ. Нельзя, слѣдовательно, полагаться на обыкновенные изоляторы при очень высокихъ напряженіяхъ. Какъ только напряженіе превышаетъ 2500 или 3000 вольтовъ, то тотчасъ необходимо прибѣгнуть къ употребленію масляныхъ изоляторовъ.

Внутри изолятора устраиваютъ одинъ или нѣсколько кольцеобразныхъ желобковъ, въ которые наливается нефтяное масло. Это послѣднее должно быть легче воды, чтобы пузырки, могущіе образоватся на поверхности масла вслѣдствіе сгущенія влажности воздуха, падали на дно и такимъ образомъ верхній слой масла всегда обезпечивалъ бы изоляцію.

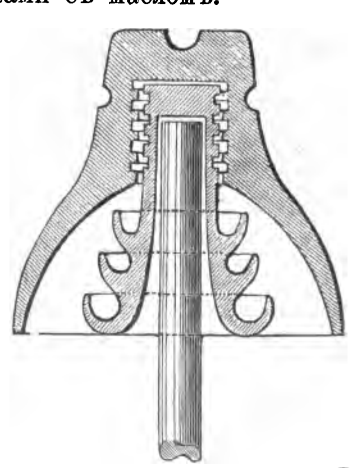

фиг. 63.

Прибавимъ, что по объему своему эти сгущенія имѣютъ весьма небольшое значеніе.

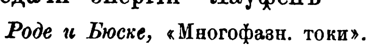
На рис. 63 представленъ изоляторъ съ однимъ желобкомъ, изготовленный простымъ загнутіемъ внутрь нижняго края колокола.

Можно еще увеличить сопротивленіе изолятора, снабдивъ его нѣсколькими желобками съ масломъ.

На рис. 64 воспроизведенъ изоляторъ подобнаго рода, состоящій изъ двухъ частей. Одна изъ нихъ, внутренняя, имѣетъ на своей внѣшней поверхности три желобка, содержащіе масло. Вторая часть, наложенная на первую, составляетъ защитительный колоколъ и въ ней помѣщается проволока линіи.

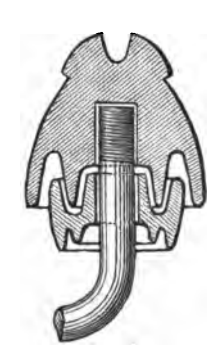

фиг. 64.

Эти два рода изоляторовъ были употреблены на линіи передачи энергіи Лауфенъ-



изоляторы

Франкфуртъ. Можно также употреблять ~~трансформаторы~~, аналогичные описаннымъ, но защищенные извнѣ отъ камней метталлическимъ покровомъ.



фиг. 65.

На рис. 65 изображенъ масляный изоляторъ съ двойнымъ колоколомъ, проектированный профессоромъ Менгарини для установки Тиволи-Римъ, выполненной фирмою Ганцъ. Верхняя часть представляетъ собою обыкновенный изоляторъ съ двойнымъ колоколомъ, нижняя часть снабжена желобкомъ, который наполняется масломъ и въ который погружаютъ внутренній колоколъ изолятора. Такого рода приспособленіе дѣлаетъ невозможнымъ или по крайней мѣрѣ очень труднымъ проникновеніе насѣкомыхъ во внутреннюю часть изолятора. Нижняя часть изолятора можетъ опускаться для чистки прибора и для наполненія желобка масломъ.

Канализація при трехфазномъ токѣ для одновременнаго питанія двигателей и лампъ.

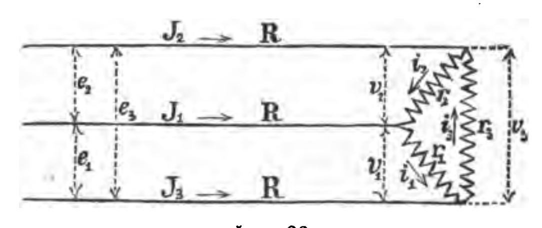
Въ первой части этого труда мы показали вычисленіе линіи трехфазнаго тока какъ при соединеніи треугольникомъ, такъ и при соединеніи звѣздочкой, но въ предположеніи, что нагрузки трехъ вѣтвей одинаковы, что имѣетъ мѣсто, когда установка служитъ исключительно для питанія однихъ только двигателей. Но если распредѣляемая энергія служитъ не только двигательной силою, а также и для освѣщенія, то обыкновенно три провода имѣютъ различныя нагрузки. Мы изслѣдуемъ ниже дѣйствіе этихъ различій въ нагрузкѣ на напряженіе у зажимовъ приборовъ-пріемниковъ и укажемъ способъ обезпечить наибольшую равномѣрность этого напряженія.

Мы разсмотримъ послѣдовательно какъ соединенie закрытое, такъ и соединенie открытое и предположимъ для упрощенiя, что цѣпи прiемниковъ представляютъ собою простыя сопротивленiя. Мы также допустимъ, что происходящее отъ различiя нагрузокъ трехъ проводовъ измѣненie воздѣйствiи цѣпей генератора и трансформаторовъ можетъ быть не принято во вниманie.

Соединенie треугольникомъ.

Пусть будетъ линiя, въ началѣ которой поддерживаютъ три напряженiя e_1, e_2, e_3, имѣющiя одинаковую среднюю E,

$$(1)\quad \begin{cases} e_1 = E\sqrt{2}\sin mt \\ e_2 = E\sqrt{2}\,\mathrm{siu}\left[mt - \frac{2\pi}{3}\right] \\ e_3 = E\sqrt{2}\sin\left[mt - \frac{4\pi}{3}\right] \\ e_1 + e_2 + e_3 = o \end{cases}$$



фиг. 66.

Пусть будетъ v_1, v_2, v_3 напряженiя у зажимовъ цѣпей прiемниковъ. Имѣемъ:

$$(2)\quad \begin{cases} e_1 - R(j_1 - j_3) - v_1 = 0 \\ e_2 - R(j_2 - j_1) - v_2 = 0 \\ e_3 - R(j_3 - j_2) - v_3 = 0 \end{cases}$$

Кромѣ того:

$$(3)\quad \begin{cases} v_1 = r_1 \; i_1 \\ v_2 = r_2 \; i_2 \\ v_3 = r_3 \; i_3 \end{cases}$$

Выводимъ изъ (2)

$$(4)\qquad v_1 + v_2 + v_3 = e_1 + e_2 + e_3 = 0$$

Имѣемъ очевидно:

$$(5)\quad \begin{cases} j_1 = i_1 - i_2 \\ j_2 = i_2 - i_3 \\ j_3 = i_3 - i_1 \end{cases}$$

Откуда:

$$j_1 + j_2 + j_3 = 0$$

и слѣдствіе этого:

$$(6)\quad \begin{cases} j_1 - j_2 = i_1 - 2\, i_2 + i_3 \\ j_2 - j_3 = i_1 + i_2 - 2\, i_3 \\ j_3 - j_1 = i_2 - 2\, i_1 + i_3 \end{cases}$$

Выводимъ изъ (2) и (6):

$$\begin{aligned} v_1 &= e_1 - \mathrm{R}\;(2\, i_1 - i_2 - i_3) \\ v_2 &= e_2 - \mathrm{R}\;(2\, i_2 - i_1 - i_3) \\ v_3 &= e_3 - \mathrm{R}\;(2\, i_3 - i_2 - i_1) \end{aligned}$$

Откуда, принимая во вниманіе (3) и (4):

$$(7)\quad \begin{cases} \dfrac{3\,\mathrm{R} + r_1}{r_1}\, v_1 - \dfrac{3\,\mathrm{R} + r_2}{r_2}\, v_2 = e_1 - e_2 \\[2ex] \dfrac{3\,\mathrm{R} + r_3}{r_3}\, v_1 + \dfrac{3\,\mathrm{R}\, r_2 + 3\,\mathrm{R}\, r_3 + 2\, r_2\, r_3}{r_2 r_3}\, v_2 = e_2 - e_3 \\[2ex] v_3 = -(v_1 + v_2) \end{cases}$$

Положимъ, чтобы упростить писаніе:

$$(8)\quad \begin{cases} \dfrac{3R+r_1}{r_1}=a \\ \dfrac{3R+r_2}{r_2}=b \\ \dfrac{3R+r_3}{r_3}=a_1 \\ \dfrac{3Rr_2+3Rr_3+2r_2r_3}{r_2r_3}=b_1 \end{cases}$$

Будемъ имѣть:

$$(9)\qquad v_1=\frac{(e_1-e_2)\,b_1+(e_2-e_3)\,b}{a\,b_1+a_1\,b}$$

Пусть будетъ еще:

$$(10)\quad \begin{cases} \dfrac{3Rr_3+3Rr_1+2r_3r_1}{r_3r_1}=b_2 \\ \dfrac{3Rr_1+3Rr_2+2r_1r_2}{r_1r_2}=b_3 \end{cases}$$

Получимъ:

$$(11)\qquad v_2=\frac{(e_2-e_3)\,b_2+(e_3-e_1)\,a_1}{b\,b_2+a\,a_1}$$

$$(12)\qquad v_3=\frac{(e_3-e_1)\,b_3+(e_1-e_2)\,a}{a_1\,b_3+b\,a}$$

Подставимъ вмѣсто e_1, e_2, e_3 ихъ величины изъ (1) и положимъ что:

$$(13)\quad \begin{cases} \dfrac{\dfrac{\sqrt{3}}{2}(2b-b_1)}{\dfrac{3}{2}b_1}=tg\,\varphi_1 \\ \dfrac{\dfrac{\sqrt{3}}{2}(2a_1-b_2)}{\dfrac{3}{2}b_2}=tg\,\varphi_2 \end{cases}$$

$$(13a)\left\{ \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}(2a-b_3)}{\frac{3}{2}b_3}=tg\,\varphi_3. \right.$$

Тогда уравненія (9), (11), (12) обратятся въ:

$$(14)\quad v_1=\frac{E\sqrt{2}}{ab_1+a_1b}\sqrt{\left(\frac{3}{2}b_1\right)^2+\left(\frac{\sqrt{3}}{2}(2b-b_1)\right)}\times\sin(mt-\varphi_1)$$

$$(15)\quad v_2=\frac{E\sqrt{2}}{bb_2+aa_1}\sqrt{\left(\frac{3}{2}b_2\right)^2+\left(\frac{\sqrt{3}}{2}(2a_1-b_2)\right)^2}\times\sin\left(mt-\frac{2\pi}{3}-\varphi_2\right)$$

$$(16)\quad v_3=\frac{E\sqrt{2}}{a_1b_3+ba}\sqrt{\left(\frac{3}{2}b_3\right)^2+\left(\frac{\sqrt{3}}{2}(2a-b_3)\right)^2}\times\sin\left(mt-\frac{4\pi}{3}-\varphi_3\right)$$

Среднія эффиктивныя v_1, v_2, v_3 будутъ:

$$(17)\quad V_1=\frac{E}{ab_1+a_1b}\sqrt{\left(\frac{3}{2}b_1\right)^2+\left(\frac{\sqrt{3}}{2}(2b-b_1)\right)^2}$$

$$(18)\quad V_2=\frac{E}{bb_2+aa_1}\sqrt{\left(\frac{3}{2}b_2\right)^2+\left(\frac{\sqrt{3}}{2}(2a_1-b_2)\right)^2}$$

$$(19)\quad V_3=\frac{E}{a_1b_3+ba}\sqrt{\left(\frac{3}{2}b_3\right)^2+\left(\frac{\sqrt{3}}{2}(2a-b_3)\right)^2}$$

Легко повѣрить, что если три сопротивленія r_1, r_2, r_3 равны, $r_1 = r_2 = r_3 = r$, то:

$$V_1 = V_2 = V_3 = E \frac{r}{3\,R + r}$$

Примѣръ. Пусть будетъ линія трехфазнаго тока, установленная для передачи первоначальной мощности въ 100000 уаттовъ при 5000 вольтахъ, распредѣленной равномѣрно между тремя проводами. Потеря, которую соглашаются допустить на линіи, равна 10% т. е. 500 вольтамъ. Сопротивленіе R проволоки линіи дано формулою:

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0{,}10 \times \overline{5.000^v}^2}{100.000^w} = 25 \text{ омамъ.}$$

Сопротивленіе r одной какой нибудь изъ цѣпей пользованія, будетъ слѣдовательно:

$$r = \frac{4.500^a}{\left(\frac{20}{3}\right)^a} = 675 \text{ омовъ.}$$

Предположимъ теперь, что сопротивленія r_1 и r_2 оставляютъ равными r, но прерываютъ пріемники третьей цѣпи. Тогда будемъ имѣть:

$$r_1 = r_2 = r = 675 \text{ омамъ}$$
$$r_3 = \infty$$

и коэффиціенты a, b, a_1, b_1, b_2, b_3 будутъ равны:

$$a = 1{,}11 \qquad b = 1{,}11$$
$$a_1 = 1 \qquad b_1 = 2{,}11$$
$$b_2 = 2{,}11 \qquad b_3 = 2{,}22$$

Вслѣдствіе этого:

$$V_1 = 4.594 \text{ вольтамъ}$$
$$V_2 = 4.594 \quad »$$
$$V_3 = 4.826 \quad »$$

Если сдѣлать напряженіе на концѣ, напримѣръ, 1-го провода равнымъ постоянной величинѣ 4500 вольтамъ, то будемъ имѣть:

$$V_3 = 4727$$

т. е. увеличеніе около 5°/o сравнительно съ нормальнымъ напряженіемъ въ 3-емъ проводѣ.

Предположимъ теперь, что прерываютъ еще пріемники и 2-го провода. Тогда будемъ имѣть:

$$r = 675; \; r_2 = r_3 = \infty$$

и вслѣдствіе этого:

$$V_1 = 4.658 \text{ вольтамъ}$$
$$V_2 = 4.906 \quad »$$
$$V_3 = 4.906 \quad »$$

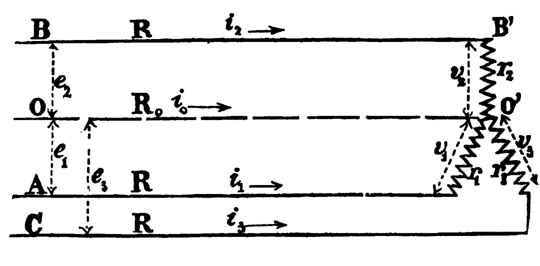
Если сдѣлать напряженіе на концѣ 1-го провода равнымъ 4500 вольтамъ, то будемъ имѣть:

$$V_2 = V_3 = 4738 \text{ вольтамъ}$$

т. е. увеличеніе напряженія во 2-омъ и 3-емъ проводахъ почти на 5,3°/o.

Соединеніе звѣздочкой.

Соединимъ центръ звѣздочки генератора съ центромъ звѣздочки пріемника сопротивленіемъ R_0 и пусть будетъ $v_0 = R_0 i_0$ разность потенціаловъ между O и O'; r_1, r_2, r_3 сопротивленія цѣпей пріемниковъ; i_0 мгновенный токъ въ общей проволокѣ OO'.



фиг. 67.

Будемъ имѣть:

$$(1)\quad \begin{cases} e_1 = E\sqrt{2}\sin mt \\ e_2 = E\sqrt{2}\sin\left(mt - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_3 = E\sqrt{2}\sin\left(mt - \frac{4\pi}{3}\right) \\ e_1 + e_2 + e_3 = 0 \end{cases}$$

Очевидно:

$$(2)\qquad i_1 + i_2 + i_3 + i_0 = 0$$

и

$$(3)\quad \begin{cases} v_1 = r_1 i_1 \\ v_2 = r_2 i_2 \\ v_3 = r_3 i_3 \end{cases}$$

Три цѣпи AOO', BOO', COO' даютъ уравненія:

$$(4)\quad \begin{cases} e_1 - R i_1 + R_0 i_0 - v_1 = 0 \\ e_2 - R i_2 + R_0 i_0 - v_2 = 0 \\ e_3 - R i_3 + R_0 i_0 - v_3 = 0 \end{cases}$$

и вслѣдствіе этого, принимая во вниманіе (2):

$$(5)\qquad v_1 + v_2 + v_3 = \left(3 + \frac{R}{R_0}\right)v_0$$

Изъ уравненій (3) и (5) получаемъ:

$$(6)\quad \begin{cases} v_1 = (e_1 + v_0)\frac{r_1}{R + r_1} \\ v_2 = (e_2 + v_0)\frac{r_2}{R + r_2} \\ v_3 = (e_3 + v_0)\frac{r_3}{R + r_3} \end{cases}$$

Откуда:

$$(7)\quad v_1+v_2+v_3=\left(\frac{r_1}{R+r_1}+\frac{r_2}{R+r_2}+\frac{r_3}{R+r_3}\right)v_0$$
$$+e_1\frac{r_1}{R+r_1}+e_2\frac{r_2}{R+r_2}+e_3\frac{r_3}{R+r_3}$$

Уровненія (5) и (7) даютъ:

$$(8)\qquad v_0=\frac{e_1\frac{r_1}{R+r_1}+e_2\frac{r_2}{R+r_2}+e_3\frac{r_3}{R+r_3}}{3+\frac{R}{R_0}-\frac{r_1}{R+r_1}-\frac{r_2}{R+r_2}-\frac{r_3}{R+r_3}}$$

отношеніе, которое опредѣляетъ v_0.

Подставимъ въ (8) вмѣсто e_1, e_2, e_3 ихъ величины и положимъ:

$$(9)\qquad \frac{r_1}{R+r_1}-\frac{1}{2}\frac{r_2}{R+r_2}-\frac{1}{2}\frac{r_3}{R+r_3}=A$$

$$(10)\qquad \frac{\sqrt{3}}{2}\left(\frac{r_2}{R+r_2}-\frac{r_3}{R+r_3}\right)=B$$

$$(11)\quad 3+\frac{R}{R_0}-\frac{r_1}{R+r_1}-\frac{r_2}{R+r_2}-\frac{r_3}{R+r_3}=C$$

и

$$(12)\qquad \frac{B}{A}=tg\,\varphi$$

Тогда равенство (8) можетъ быть написано въ видѣ:

$$(13)\qquad v_0=E\sqrt{2}\,\frac{\sqrt{A^2+B^2}}{C}\sin(mt-\varphi)$$

Средняя эффективная потери напряженія въ общей проволокѣ будетъ:

$$(14)\qquad V_0=E\,\frac{\sqrt{A^2+B^2}}{C}$$

и эффективная сила тока въ этой проволокѣ:

$$(15) \qquad I_0 = \frac{E}{R_0} \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{C}$$

Разъ потеря напряженія v_0 извѣстна, равенства (6) даютъ непосредственно напряженія v_1, v_2, v_3 у зажимовъ цѣпей пріемниковъ.

Уничтожимъ общую возвратную проволоку т. е. сдѣлаемъ:

$$R_0 = \infty$$

тогда будемъ имѣть:

$$(16) \qquad C = 3 - \frac{r_1}{R + r_1} - \frac{r_2}{R + r_2} - \frac{r_3}{R + r_3}$$

Если мы въ то же время прервемъ двѣ изъ цѣпей, сдѣлавъ напримѣръ:

$$r_2 = r_3 = \infty$$

то прервется, очевидно, и третья цѣпь.

Прервемъ теперь только одну изъ цѣпей; пусть будетъ:

$$r_3 = \infty$$

и сдѣлаемъ:

$$r_1 = r_2 = r$$

получимъ:

$$v_0 = {}^1/_2 \ e_3$$

и вслѣдствіе этого:

$$v_1 = \left(e_1 + \frac{1}{2} e_3\right) \frac{r}{R + r}$$

$$v_2 + \left(e_2 + \frac{1}{2} e_3\right) \frac{r}{R + r}$$

$$v_3 = \frac{3}{2} e_3$$

или:

$$(17)\begin{cases} v_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} E \sqrt{2} \frac{r}{R+r} \sin\left(mt + \frac{\pi}{6}\right) \\ v_2 = -v_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} E \sqrt{2} \frac{r}{R+r} \sin\left(mt - \frac{5\pi}{6}\right) \\ v_3 = 1,5 E \sqrt{2} \sin\left(mt - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

Слѣдовательно, v_1, v_2, v_3 будутъ имѣть средними эффективными:

$$(18)\begin{cases} V_1 = 0,865 E \frac{r}{R+r} \\ V_2 = 0,865 E \frac{r}{R+r} \\ V_3 = 1,5 E \end{cases}$$

Слѣдовательно, при открытомъ соединеніи безъ общей проволоки неодинаковость нагрузокъ трехъ проводовъ можетъ вызвать:

1. Существенныя отодвинутія токовъ.

2. Значительную разницу между напряженіями у зажимовъ различныхъ цѣпей пріемниковъ.

Такимъ образомъ соединеніе звѣздочкой можетъ примѣняться только въ канализаціяхъ, питающихъ исключительно двигатели. При неодинаковости нагрузокъ трехъ проводовъ соединеніе треугольникомъ представляетъ значительное преимущество передъ соединеніемъ звѣздочкой съ тремя проволоками.

Каждый разъ, слѣдовательно, когда хотятъ примѣнить открытое соединеніе для питанія однѣхъ только лампъ или же лампъ и двигателей, необходимо соединять электрически посредствомъ четвертой проволоки центры O, O′ звѣздочекъ генераторовъ и пріемниковъ. Изложенное выше даетъ возможность легко вычислить сопротивленіе R_0 чет-

вертой проволоки, когда нагрузки i_1, i_2, i_3 трехъ проводовъ извѣстны и потери напряженія опредѣлены.

Особенный интересъ представляетъ частный случай, когда центры O и O′ соединены съ землею. Тогда будемъ имѣть замѣтно:

$$(19)\quad R_0 = O$$

въ силу (8)

$$(20)\qquad v_0 = R_0\, i_0 = O$$

Слѣдовательно, равенства (6) обратятся въ:

$$(21)\qquad \begin{cases} v_1 = e_1 \dfrac{r_1}{R + r_1} \\ v_2 = e_2 \dfrac{r_2}{R + r_2} \\ v_3 = e_3 \dfrac{r_3}{R + r_3} \end{cases}$$

v_1, v_2, v_3 будутъ имѣть средними эффективными:

$$(22)\qquad V_1 = E \frac{r_1}{R + r_1}$$

$$(23)\qquad V_2 = E \frac{r_2}{R + r_2}$$

$$(24)\qquad V_3 = E \frac{r_3}{R + r_3}$$

Если, напримѣвъ, урегулировать V_1 до данной величины и взять опредѣленное число для наибольшей величины разности $E - V_1$, то R опредѣлится изъ 22 равенства. Тогда уравненія 23 и 24 позволятъ вычислить разности $V_1 - V_2$ и $V_1 - V_3$. Мгновенный токъ i_0, проходящій чрезъ землю, данъ равенствомъ (2); затѣмъ уже легко вывести его среднюю эффективную.

Въ предшествующемъ мы допустили, что у начала разсматриваемой канализаціи, каковы бы ни были нагрузки трехъ проводовъ, все время поддерживаются напряженія e_1, e_2, e_3, имѣющія одинаковую среднюю эффективную E

и представляющія попарно одну и ту же разность фазъ. Однако, въ дѣйствительности воздѣйствія арматуры генератора, а также воздѣйствія въ трансформаторахъ дѣлаютъ неравными, при различной нагрузкѣ трехъ цѣпей, указанныя три среднія эффективныя и три разности фазъ; это неравенство будетъ тѣмъ больше, чѣмъ значительнѣе означенныя воздѣйствія.

Въ виду этого при смѣшанномъ распредѣленіи силы и свѣта генераторы должны имѣть возможно меньшее внутреннее сопротивленіе.

Если вслѣдствіе сопротивленія линіи и воздѣйствій цѣпей генераторовъ уклоненія напряженія въ трехъ цѣпяхъ слишкомъ значительны, то можно принять соединеніе звѣздочкой съ четвертой проволокой и регулировать напряженія въ цѣпяхъ посредствомъ введенныхъ въ три главные провода катушекъ воздѣйствія (choking coils), сопротивленіе которыхъ можно произвольно мѣнять. При этомъ, конечно, происходитъ потеря работоспособности, но самая незначительная.

Дѣйствіе трехфазной линіи на сосѣднія телефонныя линіи.

Мы видѣли, что при соединеніи треугольникомъ, также какъ и при соединеніи звѣздочкой съ тремя или четырьмя проволоками, алгебраическая сумма токовъ линіи постоянно равна нулю. Если, слѣдовательно, такая линія находится вблизи телефонной линіи на достаточномъ отъ нея разстояніи такъ, чтобы практически можно было принять эту линію, отстоящей одинаково отъ трехъ или четырехъ проволокъ многофазной линіи, то дѣйствія индукціи будутъ совершенно незамѣтны.

Въ случаѣ же соединенія звѣздочкой, когда центры звѣздочекъ сообщены съ землею и линія служитъ для совмѣстнаго питанія двигателей и лампъ, то вообще алгебраическая сумма токовъ въ трехъ проводахъ будетъ разниться отъ нуля и кромѣ того нѣкоторый токъ пройдетъ

чрезъ землю. Въ этомъ случаѣ необходимо, слѣдовательно, принять спеціальныя мѣры предосторожности во избѣжаніе дѣйствія индукціи на сосѣднія телефонныя линіи.

ГЛАВА X.

Описаніе нѣкоторыхъ установокъ.

Передача энергіи отъ Лауфена до выставки во Франкфуртѣ на Майнѣ въ 1891 году.

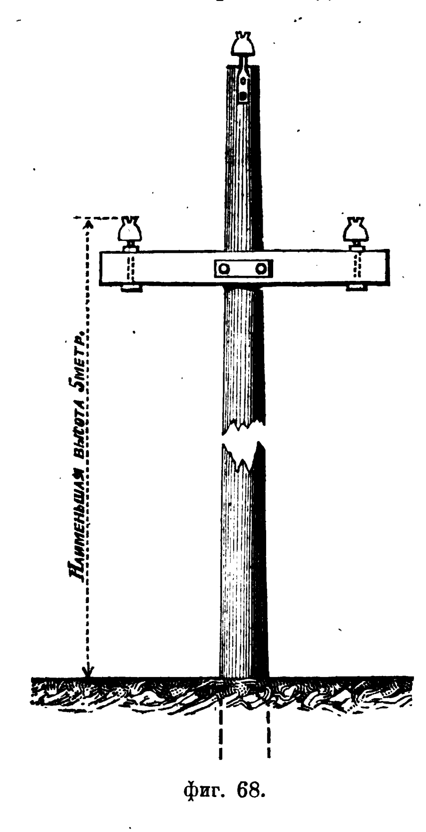
Эта установка была проектирована и выполнена совмѣстно Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft въ Берлинѣ и мастерскими Oerlikon'а возлѣ Цюриха.

Станція генераторъ была установлена на вододѣйствующемъ заводѣ портландскаго цемента въ Лауфенѣ на Неккарѣ (Вюртембергъ). Эта станція должна была въ дальнѣйшемъ служить для распредѣленія энергіи въ Гейльбронѣ.

При посредствѣ турбины въ 300 лошадиныхъ силъ приводился въ дѣйствіе трехфазный генераторъ Броуна въ 200 килоуаттовъ (описанный нами раньше), имѣвшій угловую скорость, равную 150 оборотамъ въ минуту. Возбужденіе генератора производилось отдѣльною маленькою динамо.

По выходѣ изъ генератора напряженіе тока увеличивалось до надлежащаго предѣла посредствомъ особаго трансформатора. Во Франкфуртѣ три трансформатора уменьшали это напряженіе до 100 вольтовъ. Полученный токъ низкаго напряженія питалъ двигатели и 1000 лампочекъ накаливанія. Длина линіи отъ Лауфена до Франкфурта составляла 175 километровъ. Линія состояла изъ трехъ мѣдныхъ голыхъ проводовъ діаметромъ въ 4 мм., имѣвшихъ всего въ длину 530 километровъ и вѣсившихъ вмѣстѣ около 60000 килограммовъ. Эта линія поддерживалась

3000 деревянными столбами высотою каждый въ 8 метровъ, отстоявшихъ другъ отъ друга на разстоянiи около 60 метровъ. Проволоки были помѣщены на высотѣ минимумъ въ 5 метровъ надъ землею.

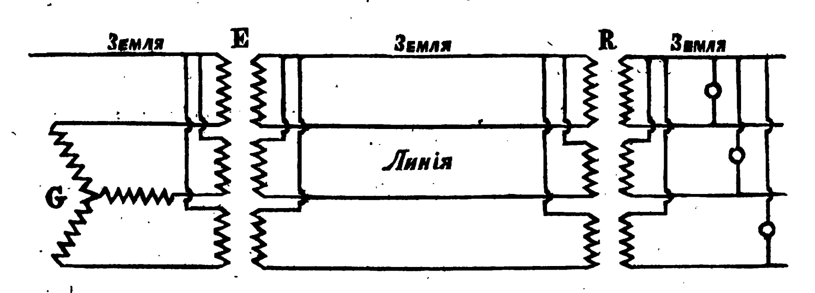


фиг. 68.

На рис. 63 и 64 изображены два рода изоляторовъ, употреблявшихся на этой линiи. Рис. 68 показываетъ расположенiе изоляторовъ на столбахъ: одинъ изъ изоляторовъ помѣщенъ на вершинѣ столба, а два другихъ на концахъ деревянной горизонтальной перекладины, прикрѣпленной болтами къ столбу. Три проволоки проведены по направленiю реберъ равносторонней треугольной призмы.

Рис. 69 представляетъ собою схему установки генератора G, трансформатора для увеличенiя напряженiя E, линiи и трансформаторовъ для уменьшенiя напряженiя R. Токъ высокаго напряженiя не имѣлъ прерывателя. Въ началѣ линiи проволоки въ 4 мм. были замѣнены мѣдными проволоками въ 0,15 мм. въ дiаметрѣ, длиною въ 2^м,50, служившими предохранителями, разсчитанными на напряженiе отъ 20000 до 30000 вольтовъ; эти проволоки были протянуты между двумя отдѣльными столбами, отстоявшими другъ отъ друга на разстоянiи приблизительно 2^м,50, что устраняло натягиванiе тонкихъ проволокъ проволоками линiи. Центры звѣздочекъ трансформаторовъ вы-

сокаго и низкаго напряженій, въ началѣ и концѣ установки, были соединены съ землею для обезпеченія безопасности служебнаго персонала на случай, если бы гдѣ либо порвалась проволока линіи или же произошло сообщеніе между двумя проволоками высокаго и низкаго напряженій. Если бы какая либо проволока получила сообщеніе съ землею, то тотчасъ же расплавился бы соотвѣтствующій предохранитель.



фиг. 69.

Кромѣ того, въ началѣ каждой проволоки линіи были помѣщены магнитные релэ, назначеніе которыхъ прекращать возбужденіе динамо, лишь только токъ превыситъ извѣстный предѣлъ, напримѣръ въ случаѣ сообщенія съ землею, или же будетъ меньше предѣла, соотвѣтствующаго слишкомъ слабой нагрузкѣ цѣпи, отъ чего можетъ получиться напряженіе тока, угрожающее опасностью.

Мы воспроизводимъ ниже таблицу *), въ которой указаны результаты измѣреній, произведенныхъ надъ этой передачей энергіи Коммисіей Франкфуртской Выставки.

Эти опыты производили: профессоръ Дитрихъ, доктора: Фейснеръ, Геймъ, Коппъ; инженеры: Ниццола и Шмалеръ и профессоры: Штенгеръ, Теихманнъ, Вуа (Voit) и Веберъ.

*) «L'Industrie électrique» 25 Іюня 1892 г.

Въ послѣднемъ столбцѣ таблицы указана окончательная отдача, т. е. отношеніе работоспособности, переданной лампамъ, къ работоспособности, полученной у оси турбины въ Лауфенѣ.

При распредѣленіи энергіи необходимо для полученія окончательной отдачи принять еще во вниманіе отдачу двигателей. Указанія относительно этого предмета можно найти въ приведенной нами выше (стр. 89) таблицѣ трехфазныхъ двигателей Allgemeine Elektricitäts - Gesellschaft.

Разность потенціаловъ у зажимовъ каждой изъ трехъ цѣпей генератора, имѣвшаго соединеніе звѣздочкой, колебалась между 50 и 56 вольтами.

Отношеніе числа вторичныхъ оборотовъ проволоки въ трансформаторѣ къ числу первичныхъ оборотовъ было равно 160. Слѣдовательно, напряженіе въ каждой вторичной цѣпи трансформатора, между ея зажимомъ и центромъ звѣздочки, было равно:

$$50^{v} \times 160 = 8000 \text{ вольтамъ}$$

$$56^{v} \times 160 = 8980 \quad \text{»}$$

И такъ напряжсніе между двумя какими нибудь проволоками линіи было:

въ первомъ случаѣ:

$$8000 \times \sqrt{3} = \text{около } 13850 \text{ вольтовъ;}$$

и во второмъ случаѣ:

$$8980 \times \sqrt{3} = \text{около } 15450 \text{ вольтовъ.}$$



Передача энергіи отъ Лауфена до Франкфурта.

ВРЕМЯ.	Турбина.	Динамо.		Трансформаторъ на станціи отправленія.		Линія.	Трансформаторъ на станціи пользованія.			Отдача установки.		Состояніе погоды.
	Доставлен. работоспособность въ томъ числѣ и возбужд. динамо.	Доставленная работоспособность.	Отдача.	Доставленная работоспособность.	Отдача.	Потеря.	Полученная работоспособность.	Отданная работоспособность.	Отдача.	Отъ зажимовъ динамо до пріемника.	Отъ оси турбины до пріемника.	
Октябрь 1891 г.	лош. силы.	лош. силы.	на 100.	лош. силы.	на 100.	лошадиныя силы.	лошадиныя силы.	лошадиныя силы.	на 100.	на 100.	на 100.	
11 — 1ч. 30м. 1ч. 40м.	120,9	108,1	89,4	102,4	94,7	7,3	95,1	89,5	94,1	82,6	74,0	Безоблачно, сухо.
1 50 2 »	121,1	108,3	89,4	102,6	94,7	7,6	95.0	89,4	94,1	82,4	73,8	
12 — 1 35 1 45	127,0	114,4	90,0	108,7	95,0	8,0	100,7	95,1	94,4	83,0	74,9	Облачно, частый дождь.
1 50 2 »	127,5	114,8	90,0	109,0	95,0	8,1	100,9	95,3	94,4	82,9	74,8	
2 10 2 20	99,3	86,8	87,4	81,5	93,9	5,0	76,5	71,4	93,3	82,4	71,9	
13 — 9 50 10 »	105,9	93,3	88,1	87,7	94,0	6,0	81,7	76,3	93,4	81,6	72,1	Дождь до полудня.
10 5 10 15	105,9	93,3	88,1	87,7	94,0	5,9	81,8	76,4	93,4	81,7	72,2	
14 — 10 45 10 55	151,8	139,1	91,6	132,8	95,5	12,8	120,0	114,0	95,0	81,8	75,1	Сухо.
11 » 11 10	151,7	139,0	91,6	132,7	96,1	12.5	120,2	114,2	95,0	82,0	75,3	
11 35 11 45	194,7	182,3	93,5	175,1	96,1	24,4	150,7	144,2	95,7	79,1	74,1	
12 30 12 40	197,4	184,8	93,5	177,6	96,1	25,2	152,4	145,8	95,7	78,8	73,9	
1 30 1 40	117,6	104,9	89,2	99,2	94,6	7,5	91,7	86,2	94,0	82,0	73,3	
1 45 1 55	112,7	100,1	88,8	94,5	94,4	6,9	87,6	82,2	93,8	81,9	72,9	
2 30 2 40	78,2	61,1	84,5	61,1	92.5	3,1	58,0	53,5	92,2	80,9	68,5	
15 — 10 53 11 3	190,7	177,9	93,3	170,8	96,0	25,5	145,3	138,9	95,6	77,8	72,8	
11 5 11 15	190,0	177,3	93,3	170,2	96,0	24,9	145,3	138,9	95,6	78,1	73,1	Дождь съ утра.
11 20 11 30	189,7	177,0	93,3	169,9	96,0	24,6	145,3	138,9	95,6	78,1	73,2	

Проектъ распредѣленія электрической энергіи въ г. Будапестѣ [1]).

Эта установка поручена фирмѣ Шукертъ въ Нюрембергѣ.

Станція должна находиться на разстояніи трехъ километровъ отъ города. Электрическая энергія будетъ передаваться на мѣсто пользованія въ формѣ двухфазнаго тока высокаго напряженія. Тамъ она будетъ преобразовываться и распредѣляться уже въ видѣ постояннаго тока низкаго напраженія.

Прежде всего станція должна быть снабжена всѣмъ необходимымъ для образованія тока, могущаго питать одновременно 10000 лампъ въ 16 свѣчей. Установка вычислена на 16000 лампъ и будетъ произведена такимъ образомъ, чтобы возможно было въ случаѣ надобности, утроить работоспособность станціи.

Сначала будутъ установлены двѣ вертикальныя паровыя машины тройнаго расширенія, могущія развивать каждая 500 лошадиныхъ силъ. Каждая изъ этихъ машинъ будетъ непосредственно приводить въ дѣйствіе одну динамо двухфазнаго тока, дающую два тока въ 100 амперовъ и 1800 вольтовъ, отодвинутыхъ на $^1/_4$ періода. Такимъ образомъ каждый генераторъ будетъ имѣть работоспособность, равную 360 килоуаттамъ.

Обѣ динамо будутъ соединены параллельно и будутъ возбуждаться токомъ отъ динамо низкаго напряженія, которыя въ то же время должны служить для освѣщенія станціи.

Первичная линія въ четыре проволоки будетъ подземной и должна состоять изъ двухъ кабелей въ два кон-

---

*) Благодаря любезности Анонимнаго Общества Электричества въ Нюренбергѣ, бывш. Шукертъ и К°, сообщившаго намъ необходимыя свѣдѣнія, мы помѣщаемъ ниже въ видѣ приложенія къ книгѣ болѣе подробное описаніе Центральной Электрической станціи въ Будапестѣ, соотвѣтствующее положенію дѣла въ настоящій моментъ.

(*Прим. перев.*).

центричныхъ провода со свинцовою оболочкою и съ двойною желѣзною оправою. Третій кабель, тождественный съ первыми, долженъ быть запаснымъ.

Эта линія должна служить для передачи двухфазнаго тока на станцію распредѣленія, гдѣ онъ будетъ приводить въ дѣйствіе двухфазные двигатели, соединенные каждый непосредственно съ генераторомъ постояннаго тока. Послѣдніе генераторы должны питать двѣ крайнія изъ трехъ проволокъ вторичной канализаціи. Такимъ образомъ, напряженіе генератора будетъ вдвое больше напряженія между одной изъ крайнихъ и среднею проволоками.

Кромѣ того, станція распредѣленія будетъ имѣть баттарею аккумуляторовъ въ 148 элементовъ, вмѣстимостью отъ 1500 до 2200 амперовъ-часовъ, смотря по надобности, могущую давать токъ силою два раза 500 амперовъ. Эта баттарея будетъ соединена своими концами съ двумя крайними проволоками канализаціи и срединою со среднею обратною проволокою. Напряженіе бууетъ регулироваться особыми приборами, позволяющими измѣнять число элементовъ въ цѣпи, сообразно потребности.

Передача и распредѣленіе электрической энергіи въ Гейльбронѣ на Некарѣ.

Гейльбронъ (Вюртембергъ) промышленный городъ съ населеніемъ около 31000 человѣкъ. Станція установлена въ Лауфенѣ на Некарѣ, на заводѣ портландскаго цемента Вюртембергскаго Общества на разстояніи приблизительно десяти километровъ отъ Гейльброна. Этотъ заводъ располагаетъ водопадомъ, имѣющимъ работоспособность въ 1500 лош. силъ, изъ которыхъ только 600 пользуются для производства цемента. Такимъ образомъ, Вюртембергское Общество располагаетъ еще 900 лош. силами для полученія электрической энергіи, которая можетъ быть распредѣлена въ Гейльбронѣ.

Какъ извѣстно, эта установка вызвала опыты 1891 г. надъ передачей энергіи отъ Лауфена до Франкфуртской выставки.

Въ настоящее время станція имѣетъ двѣ турбины въ 300 лош. силъ каждая, построенныя мастерскими Geislingen'а и, кромѣ того, оставлено еще мѣсто для установки третей турбины.

Турбины съ вертикальными осями приводятся въ движеніе паденіемъ воды съ высоты $3^{м},85$; ихъ угловая скорость равна 35 оборотамъ въ минуту. Регулированіе скорости производится посредствомъ измѣненія отъ руки притока воды.

Каждая турбина парою зубчатыхъ колесъ приводитъ въ дѣйствіе динамо съ горизонтальною осью.

Эта динамо трехфазнаго тока, системы Броуна, построенная заводомъ Эрликона, была уже описана нами въ своихъ главныхъ чертахъ во второй части этого сочиненія. Ея индукторъ, имѣющій 32 полюсныя оконечности, укрѣпленъ на концѣ горизонтальной оси, поддерживаемой двумя подшипниками, достаточно удаленными другъ отъ друга для обезпеченія устойчивости индуктора. Эти подшипники составляютъ часть корпуса машины.

Вѣнцеобразная арматура машины можетъ быть сдвинута со своего мѣста для болѣе удобнаго изслѣдованія индуктора. Такое приспособленіе напоминаетъ собою машину Ферранти за исключеніемъ того, что въ динамо Броуна вся ея подвижная часть можетъ перемѣщаться по оси.

Токъ для возбужденія динамо проведенъ въ индукторъ по двумъ гибкимъ мѣднымъ шнуркамъ, поддерживаемымъ съ одной стороны двумя изолированными блоками съ желобками, прикрѣпленными къ оси машины, съ другой стороны также двумя блоками съ желобками, оси которыхъ прикрѣплены къ остову машины и получаютъ токъ для возбужденія.

Каждый генераторъ даетъ въ общемъ токъ силою въ 4000 амперовъ и напряженіемъ въ 50 вольтовъ, т. е. раз-

виваетъ у зажимовъ работоспособность, равную 200 килоуаттамъ.

Токъ для возбужденія доставляется маленькими двухполюсными динамо съ кольцомъ Грамма, приводимыми въ дѣйствіе особою турбиною. Каждый генераторъ имѣетъ для возбужденія отдѣльную динамо, дающую токъ въ 20 амперовъ при 60 вольтахъ. Работоспособность, расходуемая въ обмоткѣ генератора, равна приблизительно 1200 уаттамъ, т. е. составляетъ 0,6% всей работоспособности у зажимовъ. Такой незначительный расходъ на возбужденіе показываетъ превосходство принятаго расположенія магнитной цѣпи и индуктора. Промышленная отдача опредѣлена строителями въ 96%.

Токъ генератора въ 50 вольтовъ проведенъ посредствомъ трехъ толстыхъ кабелей къ распредѣлительной доскѣ. Эта послѣдняя устроена Allgemeine Eliktricitäts Gesellschaft въ Берлинѣ и снабжена вольтометрами, амперометрами и прерывателями для двухъ генераторовъ. Главные прерыватели служатъ для быстраго прерыванія въ трехъ цѣпяхъ трехъ токовъ въ 1300 амперовъ приблизительно. Два барабанообразные реостата употребляются для регулированія возбужденія.

Кромѣ того, станція располагаетъ двумя трансформаторами въ 200 килоуаттовъ каждый, служащими для преобразованія тока одного генератора 4000 амперовъ и 50 вольтовъ въ токъ приблизительно 40 амперовъ и 5000 вольтовъ. Слѣдовательно, ихъ отношеніе трансформаціи равно 100. Обмотки этихъ трансформаторовъ изъ толстой проволоки соединены съ распредѣлительною доскою посредствомъ шести кабелей діаметромъ въ 29 мм.

Въ настоящее время оказывается достаточною работа одной динамо, другая же служитъ въ качествѣ запасной. Два трансформатора, увеличивающіе напряженіе въ Лауфенѣ, работаютъ при половинной нагрузкѣ.

Магнитный остовъ этихъ трансформаторовъ трехфазнаго тока состоитъ изъ трехъ вертикальныхъ сердечни-

ковъ, составленныхъ изъ полосъ тонкаго листового желѣза; два плоскія кольца изъ желѣзной ленты скрѣпляютъ эти сердечники и магнетически соединяютъ ихъ концами. Каждый трансформаторъ снабженъ шестью зажимами; тремя для первичной обмотки и тремя для вторичной. Проводники высокаго напряженія заключены по выходѣ ихъ изъ трансформатора въ стеклянныя трубки. Сами трансформаторы помѣщены въ металлическій футляръ, наполненный масломъ.

Станція въ Лауфенѣ соединена съ распредѣлительной станціею въ Гейльбронѣ посредствомъ воздушной линіи. Эта послѣдняя состоитъ изъ трехъ мѣдныхъ голыхъ проводниковъ діаметромъ въ 6 мм. и длиною каждый въ общемъ около 11 километровъ. Проводники поддерживаются масляными изоляторами съ простымъ колоколомъ, укрѣпленными на столбахъ, отстоящихъ одинъ отъ другого на разстояніи приблизительно 40 метровъ. Высота этихъ столбовъ измѣняется отъ 8 до 16 метровъ такимъ образомъ, что она всегда превосходитъ наибольшую высоту деревьевъ, встрѣчающихся на протяженіи линіи. Каждый столбъ на верхнемъ своемъ концѣ снабженъ деревянною перекладиною, длина которой разсчитана на установку трехъ линій, т. е. девяти изоляторовъ. До сихъ поръ установлена только одна изъ этихъ линій. Кромѣ того, каждый столбъ имѣетъ три изолятора, поддерживающіе три бронзовыя проволоки діаметромъ 1,5 мм., предназначенныя для взятія напряженія на концѣ линіи, или же для телефоннаго соединенія станціи Лауфена съ распредѣлительною станціею въ Гейльбронѣ. Всѣ столбы снабжены еще громоотводами, соединенными съ землею посредствомъ колючей проволоки, препятствующей взлѣзать на столбъ; наконецъ металлическая проволока, помѣщенная надъ линіей, соединяетъ всѣ громоотводы между собою.

На своемъ пути линія питаетъ нѣсколько трансформаторовъ въ Sontheim'ѣ, установленныхъ на чердакахъ до-

мовъ и преобразующихъ непосредственно токъ 5000 вольтовъ въ токъ 100 вольтовъ.

Вторичная канализація состоитъ изъ трехъ проволокъ.

Главная линія доходитъ до распредѣлительной станціи, расположенной въ предмѣстьѣ Гейльброна. Эта станція помѣщается въ небольшомъ зданіи, гдѣ находится такой же трансформаторъ, какіе употребляются на главной станціи, но работающій почти при полной нагрузкѣ. Этотъ трансформаторъ служитъ для пониженія напряженія первичнаго тока до 1500 вольтовъ. Распредѣлительная станція снабжена еще нѣкоторыми вспомогательными приборами какъ то: прерывателями, телефономъ, позволяющимъ переговариваться со станціею въ Лауфенѣ и автоматическимъ предохранителемъ, прерывающимъ токъ въ 5000 вольтовъ въ случаѣ разрыва проволоки линіи.

Токъ въ 1500 вольтовъ проведенъ отъ этой станціи въ центръ города Гейльброна посредствомъ подземнаго кабеля изъ трехъ проводниковъ. Уменьшеніе напряженія имѣетъ цѣлью не вводить въ городъ токъ слишкомъ высокаго напряженія и облегчить трудность изолированія подземной сѣти, питающей трансформаторы. Изъ центра города токъ распредѣляется между рядомъ фидеровъ, пробѣгая главныя артеріи и питая трансформаторы, помѣщенные приблизительно на двадцати вторичныхъ станціяхъ. Кабели высокаго напряженія снабжены свинцовымъ покровомъ и желѣзною оправою; они изготовлены фирмою Сименсъ и Гальске въ Берлинѣ. Соединенія произведены посредствомъ чугунныхъ коробокъ.

Станціи, гдѣ помѣщаются трансформаторы, представляютъ собою кіоски съ подвижнымъ наружнымъ покровомъ изъ листового желѣза, устроенныя на улицахъ и площадяхъ. Эти кіоски состоятъ изъ трехъ этажей; въ двухъ верхнихъ помѣщаются трансформаторы, установленные на деревянныхъ платформахъ, поддерживаемыхъ желѣзными перекладинами. Дверь, расположенная на одномъ уровнѣ съ землею, служитъ входомъ въ нижній

этажъ кіоска, гдѣ находится распредѣлительная доска, соединенная съ кабелемъ, проводящимъ токъ въ 1500 вольтовъ; отъ этой доски идутъ кабели, распредѣляющіе токъ въ 100 вольтовъ и на ней же расположены прерыватели, предохранитель и амперометры.

Въ самомъ Гейльбронѣ употребляются трансформаторы въ 5 и 10 килоуаттовъ; они имѣютъ каждый три сердечника и устроены точно также, какъ и трансформаторы въ 200 килоуаттовъ. Эти трансформаторы, соединенные параллельно, питаютъ подземную сѣть, проводящую токъ въ 100 вольтовъ и составленную изъ кабелей съ тремя проводниками подобно тому, какъ фидеры для тока въ 1500 вольтовъ. Внутреннія установки не отличаются замѣтно отъ обыкновенныхъ внутреннихъ установокъ. Канализація каждаго обонента управляется прерывателемъ и охраняется предохранителями.

Большая часть трехфазнаго тока употребляется для освѣщенія дуговыми лампами и лампами накаливанія. Если установка заключаетъ не болѣе 15 лампъ накаливанія, то отвѣтвленіе берутъ отъ одной изъ трехъ секцій, въ противномъ же случаѣ отвѣтвленіе дѣлается отъ трехъ проволокъ сѣти.

Двигатели слабой работоспособности питаются посредствомъ трехъ проводниковъ тока въ 100 вольтовъ; двигатели же большей работоспособности въ 3 лош. силы введены въ отвѣтвленія непосредственно отъ проводниковъ тока въ 1500 вольтовъ.

Во избѣжаніе нарушенія правильности освѣщенія приведеніе двигателей въ дѣйствіе и ихъ остановка производятся посредствомъ реостатовъ съ жидкостью.

Эти двигатели съ закрытою арматурою, безъ коллектора отличаются весьма простою конструкціею; они приходятъ въ дѣйствіе, будучи уже нагруженными, и могутъ быть остановлены простымъ маневрированіемъ прерывателя. Они требуютъ самаго незначительнаго наблюденія, ограничивающагося почти исключительно только смазываніемъ подшипниковъ каждые восемь или пятнадцать дней.

Въ первый разъ токъ былъ пущенъ въ Гейльбронѣ 10-го Января 1892 года. Установка эксплоатируется безпрерывно съ 1-го Апрѣля того же года. Въ настоящее время она питаетъ около 2000 лампъ въ 16 свѣчей, 40 дуговыхъ лампъ и двадцать двигателей, представляющихъ вмѣстѣ работоспособность приблизительно въ 46 лош. силъ.

Измѣняющаяся такса на освѣщеніе тѣмъ ниже, чѣмъ больше ежедневное потребленіе. Стоимость лампы-часа въ 16 свѣчей, считая 3,3 уатта на свѣчу, колеблется между 0,047 фр. и 0,028 фр., что соотвѣтствуетъ колебанію стоимости килоуатта-часа между 0,93 фр. и 0,52 фр. Употребленная энергія измѣряется счетчикомъ Арона.

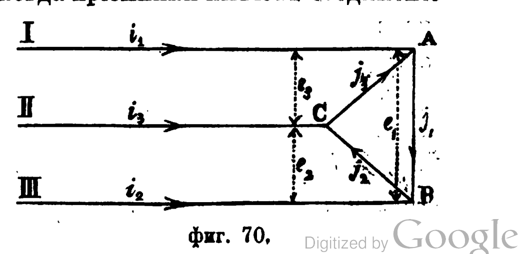
За пользованіе двигателями абоненты разсчитываются согласно показанію счетчика, или же по договору. Цѣна лошади-часа колеблется отъ 0,337 фр. или 0,42 фр., килоуаттъ-часъ до 0,092 фр. или 0,12 фр. килоуаттъ-часъ.

Расходы на первоначальное устройство установки, могущей питать 3200 лампъ въ 16 свѣчей, достигаютъ приблизительно 32500 франковъ, т. е. 100 франк. на лампу Эта станція дѣйствуетъ вполнѣ правильно и за время ея существованія на ней не было ни несчастныхъ случаевъ, ни порчи приборовъ.

ГЛАВА XI.

Счетчикъ электрической энергіи для трехфазнаго тока Д-ра Арона.

Разсмотримъ случай, когда пріемники имѣютъ соединеніе треугольникомъ; I, II, III три проводника, по которымъ токъ идетъ къ абоненту; A, B, C представляютъ собою совокупность пріемниковъ, лампъ и двигателей.



фиг. 70.

Пусть будутъ въ какой нибудь моментъ e_1, e_2, e_3 напряженія между тремя проводниками попарно, проводящими токъ къ абоненту; i_1, i_2, i_3 токи въ этихъ трехъ проводникахъ; j_1, j_2, j_3 токи въ трехъ секціяхъ AB, BC, CA.

Мгновенная работоспособность въ совокупности цѣпей пріемниковъ будетъ имѣть выраженіемъ.

$$(1) \qquad w = e_1 j_1 + e_2 j_2 + e_3 j_3.$$

Но принимая во вниманіе изложенное въ первой части этого труда, будемъ имѣть:

$$(2) \quad \begin{cases} j_1 = \frac{1}{3}(i_1 - i_2) \\ j_2 = \frac{1}{3}(i_2 - i_3) \\ j_3 = \frac{1}{3}(i_3 - i_1) \end{cases}$$

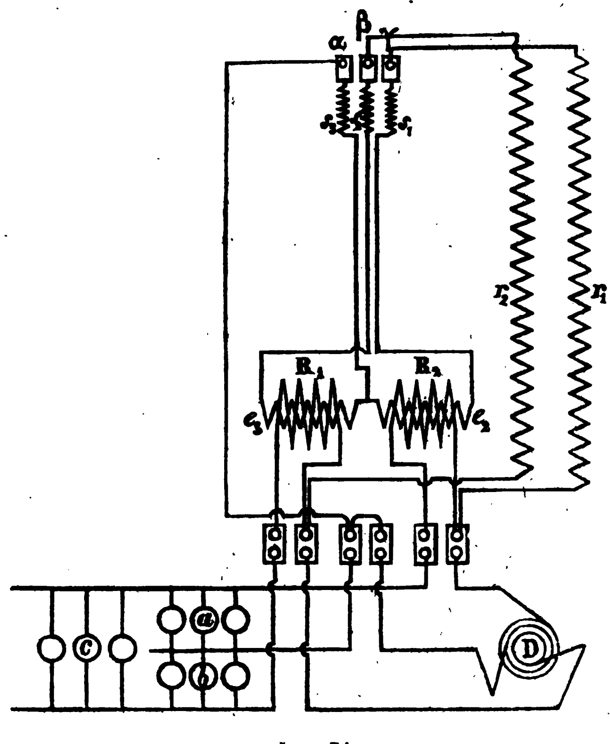
Слѣдовательно уравненіе (1) обратится въ:

$$(3) \quad w = \frac{1}{3}\left[e_1(i_1 - i_2) + e_2(i_2 - i_3) + e_3(i_3 - i_1)\right]$$

Исходя изъ этой формулы счетчикъ долженъ быть снабженъ тремя катушками изъ тонкой и шестью катушками изъ толстой проволоки.

На основаніи этого принципа, Д-ръ Аронъ устроилъ первый свой счетчикъ для многофазныхъ перемѣнныхъ токовъ. Три катушки изъ тонкой проволоки были подвѣшены къ маятнику одна надъ другою. Каждая изъ этихъ катушекъ колебалась внутри двухъ неподвижныхъ катушекъ изъ толстой проволоки. Соединенія были устроены такимъ образомъ, чтобы разность между двумя изъ трехъ токовъ i_1, i_2, i_3 дѣйствовала на разность потенціаловъ между двумя соотвѣтствующими проводниками. Но такое

устройство представляетъ неудобство большою сложностью конструкціи счетчика и трудностью его градуировать.



фиг. 71.

Слѣдующее разсужденіе привело д-ра Арона къ болѣе простому устройству счетчика:

Такъ какъ мгновенная работоспособность, поглощаемая тремя секціями пріемниковъ, дана равенствомъ (1), то, кромѣ того, какъ мы видѣли это раньше, будемъ имѣть:

$$(4) \qquad e_1 + e_2 + e_3 = o$$

и:

$$(5) \qquad j_1 - j_3 = i_1$$

$$(6) \qquad j_2 - j_1 = i_2$$

Вычтемъ:

$$j_1 (e_1 + e_2 + e_3) = o$$

изъ втораго члена уравненія (1); получимъ:

$$w = e_1 j_1 + e_2 j_2 + e_3 j_3 - j_1 (e_1 + e_2 + e_3)$$
$$= e_2 (j_2 - j_1) - e_3 (j_1 - j_3)$$

или въ силу (5) и (6):

$$(7) \qquad w = e_2 i_2 - e_3 i_1$$

Это равенство вѣрно для какого нибудь момента; оно будетъ также вѣрно, если проинтегрировать его оба члена.

На этой формулѣ, болѣе простой, чѣмъ предшествующая (3), основано устройство послѣдняго счетчика д-ра Арона для трехфазныхъ токовъ.

Рис. 71 представляетъ собою его схему:

D, генераторъ трехфазнаго тока (динамо или трансформаторъ);

a, b, c, проволоки лампъ;

e_2, e_3 катушки изъ тонкой проволоки, прикрѣпленныя къ маятнику и качающіяся внутри катушекъ R_1 и R_2;

R_1, R_2 катушки изъ толстой проволоки, по которымъ проходятъ токи i_1 и i_2;

r_1, r_2 сопротивленія, соединенныя послѣдовательно съ катушками e_2 и e_3;

s_1, s_2, s_3 пружины изъ тонкой проволоки, соединяющія катушки, прикрѣпленныя къ маятнику, съ тремя зажимами α, β, γ.

Этотъ счетчикъ былъ примѣненъ въ первый разъ при установкѣ Лауфенъ-Гейльбронъ.



ПРИЛОЖЕНІЕ.

Центральная электрическая станція въ Будапештѣ.

Центральная станція въ Будапештѣ установлена Анонимнымъ Обществомъ Электричества, бывш. Шукертъ и К°, на средства Всеобщей Австрійской Компаніи газоваго освѣщенія. Станція служитъ для распредѣленія электрической энергіи въ большей части города Будапеста.

Центральная установка расположена въ окрестностяхъ города, откуда электрическая энергія, развиваемая тремя динамо, приводимыми въ дѣйствіе паровыми двигателями въ 400 лош. силъ каждый, передается въ видѣ перемѣннаго тока на распредѣлительныя станціи. Кромѣ трехъ динамо большихъ размѣровъ въ помѣщеніи, смежномъ съ главнымъ машиннымъ зданіемъ, установлено еще два альтернатора въ 70 килоуаттовъ, приводимые въ дѣйствіе двумя локомобилями въ 100 лошад. силъ каждый. Установка этихъ альтернаторовъ вызвана необходимостью поторопиться открытіемъ станціи, на устройство которой было дано слишкомъ мало времени.

На распредѣлительныхъ станціяхъ, изъ которыхъ одна въ настоящій моментъ уже совершенно окончена, перемѣнный токъ преобразуется въ постоянный посредствомъ четырехъ трансформаторовъ: двухъ въ 120 килоуаттовъ и двухъ въ 240 килоуаттовъ каждый. Часть постояннаго тока употребляется непосредственно, другая же его часть

поступаетъ въ отвѣтвленіе и служитъ для заряженія аккумуляторовъ.

Каждая изъ трехъ динамо центральной станціи производитъ двухфазный токъ; непрерывная обмотка арматуры динамо раздѣлена на четыре секціи въ 90° каждая. Секціи соединены соотвѣтственно съ четырьмя кольцами, на которыхъ и собирается токъ, проводимый посредствомъ четырехъ проволокъ къ распредѣлительной станціи. Здѣсь этотъ токъ приводитъ въ дѣйствіе двухфазные двигатели, которые въ свою очередь сообщаютъ движеніе генераторамъ постояннаго тока, служащаго для питанія сѣти канализаціи и для заряженія аккумуляторовъ.

Токъ, производимый тремя динамо центральной станціи, пройдя черезъ предохранители, счетчики и амперометры, поступаетъ въ главныя полосы распредѣлительной доски. Предохранители установлены на каждой линіи. Каждый изъ альтернаторовъ имѣетъ для возбужденія отдѣльную машину, питающую непосредственно его индукторы. Кромѣ того, станція располагаетъ полосами общаго возбужденія, представляющими собою какъ бы запаснойвозбудитель. Эти полосы питаются токомъ отъ распредѣлительной станціи посредствамъ запаснаго фидера. Такимъ образомъ, съ помощью особаго коммутатора можно возбудить альтернаторы, не пользуясь машинами возбудителями. Освѣщеніе станціи обезпечивается токомъ отъ тѣхъ же полосъ, служащихъ запаснымъ возбудителемъ. Кромѣ того, токъ, необходимый для освѣщенія станціи, можетъ доставляться машинами возбудителями или же аккумуляторами станціи распредѣленія, для чего проложенъ особый запасный кабель.

Совмѣстное употребленіе перемѣнныхъ токовъ и аккумуляторовъ можетъ показаться съ перваго взгляда весьма сложнымъ, между тѣмъ, какъ доказала практика, такая система оказывается весьма простой и удобной. Соединеніе альтернаторовъ производится весьма легко безъ помощи реостатовъ, необходимо обращать вниманіе только на совпаденіе фазъ токовъ.

Для приведенія въ дѣйствіе двухфазныхъ двигателей, служащихъ въ описываемой установкѣ для преобразованія перемѣннаго тока въ постоянный, въ нихъ прупускаютъ токъ отъ баттареи аккумуляторовъ до тѣхъ поръ, пока двигатели не начнутъ вращаться синхронично. Индукторы двигателей возбуждаются также токомъ отъ аккумуляторовъ. Спеціальные разъединители, вслѣдствіе своего особеннаго расположенія, препятствуютъ экстра току, образующемуся въ моментъ размыканія цѣпи возбужденія, достигнуть напряженія, могущаго нарушить изоляцію.

Аккумуляторы установлены по системѣ Шукерта, изобрѣтеніе которой принадлежитъ главному инженеру фирмы г. Мюллеру.

Распредѣлительная станція отстоитъ отъ центральной на разстояніи 3½ километровъ.

Площадь, занятая канализаціей, составляетъ около пяти квадратныхъ километровъ; длина проводовъ равна почти ста километрамъ.



